Adesso comandano le PROTEINE

La proteomica è la grande novità del biotech. I suoi sostenitori fanno a gara per catalogare le proteine del nostro organismo e capire come interagiscono. Questi sforzi potrebbero portare a farmaci migliori e più numerosi

di Carol Ezzell
redattrice di «Scientific American»

Slim Films

Per il genoma umano sembra che non sia più tempo di stare sotto i riflettori. Oggi i ricercatori si stanno concentrando sul proteoma, l'insieme delle proteine che costituiscono le cellule e i tessuti del nostro corpo. Il genoma, il patrimonio di informazione genetica del nostro organismo, contiene solamente la ricetta per fabbricare le proteine, ma i mattoni e la calce che costituiscono le nostre cellule e che compiono la maggior parte del lavoro sono proprio le proteine. E sono sempre loro che permettono di distinguere i diversi tipi di cellule: per quanto tutte le cellule abbiano essenzialmente lo stesso genoma, esse si differenziano in base a quali geni sono attivi e a quali proteine vengono prodotte. Analogamente, cellule malate spesso producono proteine assenti in quelle sane o viceversa.

Non è quindi un caso se i ricercatori, tanto nei laboratori privati quanto in quelli accademici, stanno cercando di catalogare tutte le proteine umane e scoprire come interagiscano tra di loro. Lo scopo è di poter presto concepire farmaci migliori con meno effetti collaterali.

Raggiungere questo traguardo non sarà però una passeggiata: lo studio delle proteine è ancora più difficile di quello dei geni e le aziende biotech stanno cercando di capire quali siano gli strumenti e le tecniche più adatti. Ciò nondimeno è in corso una vera e propria competizione, in cui almeno un'azienda ha dichiarato che in capo a tre anni avrà decifrato il proteoma umano (fatto salvo che certe dichiarazioni muovono i capitali di Wall Street e dunque sono da prendere con il beneficio d'inventario): un passo importante nella comprensione della miriade di interazioni tra le singole proteine. I programmi federali americani hanno intanto messo a disposizione dei ricercatori accademici fondi per lo studio dei proteomi delle cellule tumorali e del siero, la componente acquosa del sangue umano.

E i risultati non si sono fatti attendere: lo scorso gennaio due gruppi di ricerca hanno pubblicato le mappe dell'interazione di tutte le proteine del lievito di birra, uno degli organismi modello più popolari per lo studio della biologia cellulare. In febbraio un altro gruppo ha annunciato di aver utilizzato tecniche di proteomica per sviluppare un test precoce e accurato per il tumore ovarico.

La proteomica, insomma, è pronta per diventare un grande business. Secondo un'analisi della Frost&Sullivan, il mercato globale per gli strumenti, i reagenti e i servizi legati alla proteomica raggiungerà circa 5,6 miliardi di dollari (6,36 miliardi di euro) entro il 2005, dai 700 milioni di dollari (795 milioni di euro) del 1999. E questa stima non comprende i ricavi generati dai farmaci e dai kit diagnostici che saranno sviluppati grazie agli studi di proteomica. Secondo Jessica Chutter, direttrice amministrativa e vicedirettrice per le biotecnologie di Morgan Stanley, la proteomica potrebbe anche diventare vitale per il futuro dell'industria farmaceutica. Gli investimenti in ricerca e sviluppo in questo settore hanno toccato i 30 miliardi di dollari (34 miliardi di euro) nel 2000, ma sono solo 30 i farmaci approvati nello stesso anno. «Le industrie farmaceutiche dipendono dalla proteomica - spiega la Chutter - perché sono interessate a tecnologie in grado di trainare tutto il loro processo di sviluppo, altrimenti non saranno in grado di sopravvivere.»

«I geni erano semplici»

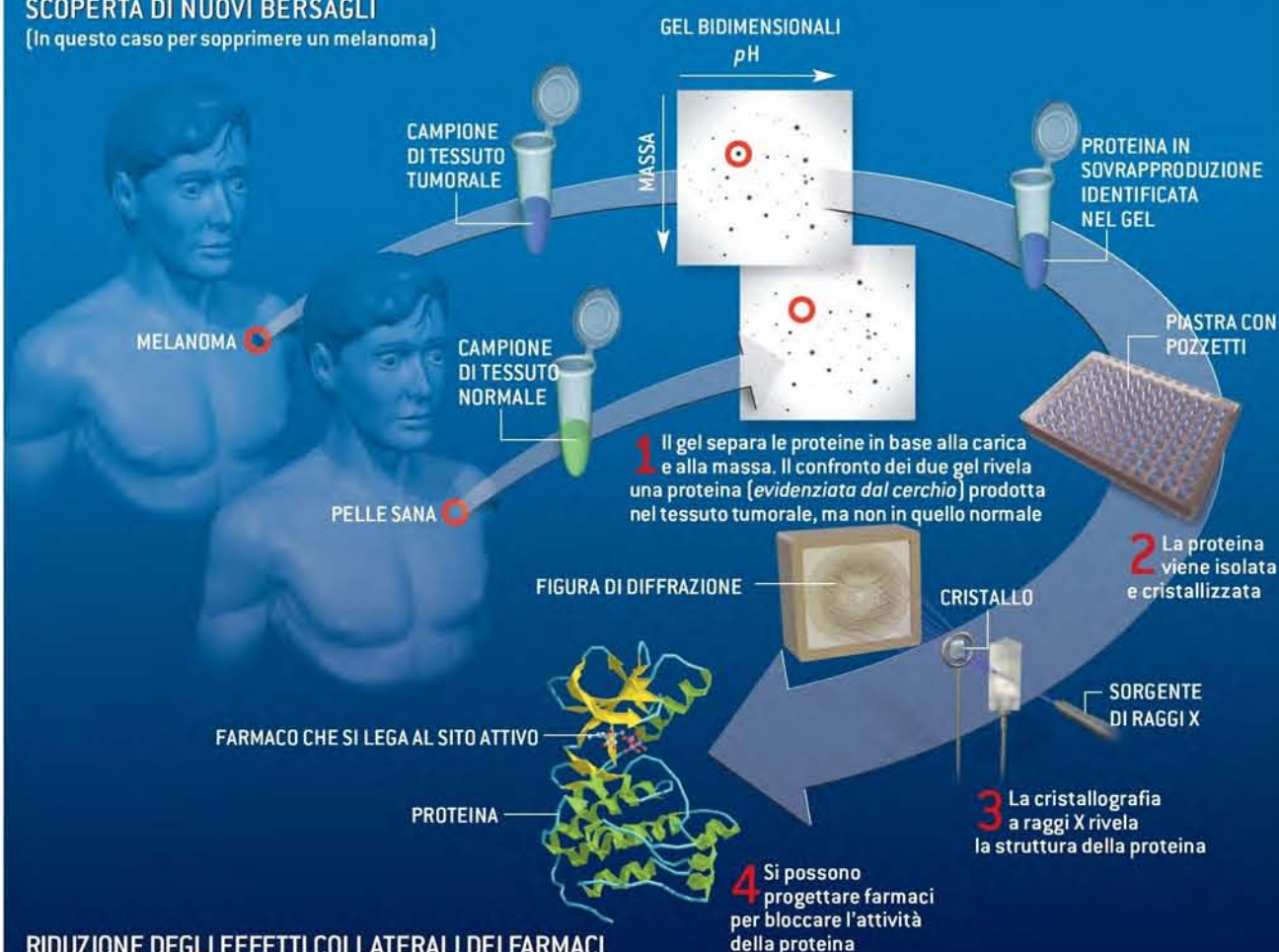
Il termine «proteoma» fu coniato nel 1994 da Marc R. Wilkins, vicepresidente e direttore della divisione di bioinformatica presso la Proteome Systems di Sydney, in Australia, per definire il complemento proteico codificato da un genoma. (Gli ammiccanti suffissi «-oma» e «-omica» sono proliferati a tal punto in biologia che oggi un sito Web offre una lista di una dozzina di termini con questo finale.) L'esatta definizione di proteomica varia a seconda dell'interlocutore, ma la maggior parte dei ricercatori concorda sul fatto che si possa ridurre a tre caratteristiche principali: identifica tutte le proteine prodotte in una determinata cellula, tessuto o organismo; definisce come queste proteine si organizzino in reti simili a circuiti elettrici; descrive infine l'esatta struttura tridimensionale di queste proteine con lo scopo di trovare il loro tallone di Achille, ossia il punto in cui l'azione di un farmaco potrebbe attivarne o disattivarne la funzione.

Questi scopi sembrano intuitivi, ma il titolo di una conferenza sulla proteomica organizzata nel 2001 la dice lunga: «Il Progetto Proteoma umano: "I geni erano semplici"». Buona parte del clamore che ha accompagnato il laboriosissimo ma ormai completato Progetto Genoma umano ha dato l'impressione che conoscere la sequenza dei circa tre miliardi di unità funzionali, o basi di DNA, che compongono il genoma umano - e la conoscenza specifica delle regioni responsabili per la codificazione delle proteine - avrebbe portato alla comprensione del funzionamento delle stesse proteine.

Sfortunatamente, il proteoma è molto più complicato del genoma. L'«alfabeto» del DNA è costituito da quattro basi chimiche indicate con le loro iniziali: adenina (A), citosina (C), guanina (G) e timina (T). Le proteine, invece, sono costituite da ben 20 unità fondamentali, gli amminoacidi. I geni specificano quali amminoacidi debbano essere combinati per produrre una determinata proteina. Ma, anche quando conoscono la sequenza di amminoacidi di una proteina, i ricercatori non sono in grado di dedurne le funzioni e le caratteristiche, né di individuare con quali altre proteine essa interagisca. Né possono sempre prevederne la struttura tridimensionale con assoluta sicurezza. A differenza dei geni, che hanno una struttura lineare, le proteine si dispongono in conformazioni che, in alcuni casi, sfuggono a ogni previsione. Come se non bastasse, le cellule spesso modificano le proteine aggiungendovi zuccheri o acidi grassi, o entrambi, in modi altrettanto difficilmente prevedibili. Per sintetizzare una proteina codificata da un gene appena scoperto, non si possono semplicemente combinare gli amminoacidi secondo l'ordine indicato dal gene. Spesso ci si deve anche assicurare che le opportune combinazioni di zuccheri e acidi grassi siano osservate. Non solo: per determinare le caratteristiche di una proteina, si deve considerare che alcune sono solubili in acqua, mentre altre si comportano normalmente solo in presenza di acidi grassi, oppure hanno re-

IN SINTESI

- Completato il Progetto Genoma umano, gli scienziati stanno cercando di capire come si organizzano le proteine all'interno di cellule e tessuti. Lo studio delle proteine è tuttavia molto più complesso e difficile di quello dei geni.
- Miliardi di dollari sono stati investiti nelle aziende dedicate allo sviluppo di farmaci e test diagnostici basati su tecniche di proteomica.
- La determinazione della struttura tridimensionale delle proteine permette ai ricercatori di individuare quali punti siano più vulnerabili all'attacco dei farmaci.

Slim Films; struttura proteina farmaco cortesia Duncan McRee Syrrx

gioni incastonate in membrane cellulari ricche di acidi grassi.

Ma neppure questo esaurisce la complessità. Per quanto gran parte dei ricercatori concordi sul fatto che il genoma umano contenga circa 40.000 geni, una cellula produce centinaia o migliaia di proteine differenti. Per comprendere il funzionamento del proteoma, i ricercatori devono conoscere le caratteristiche di tutte quelle proteine. Applicare semplicemente i dati prodotti dal Progetto Genoma umano - che ha finalmente mandato in soffitta l'obsoleto dogma secondo il quale un gene codifica per una proteina - non risolve il problema. È ormai chiaro, anche se i meccanismi rimangono spesso oscuri, che un gene può produrre molte e diverse proteine.

Nonostante queste difficoltà i ricercatori che si interessano alla proteomica restano ottimisti. «Rimane ignota una frazione compresa tra il 30 e il 50 per cento delle proteine umane così come le loro funzioni» ammette Alma L. Burlingame dell'Università della California a San Francisco. Allo stesso tempo aggiunge che «oggi siamo in grado di identificare i componenti proteici degli esseri umani abbastanza rapidamente. La prospettiva di arrivare al proteoma umano completo in un paio d'anni è realistica».

sto che da un altro confrontando la disposizione dei punti creati dai campioni sul gel.

La spettrometria di massa utilizza magneti o campi elettrici per separare proteine differenti in base alla massa degli atomi che le costituiscono e i risultati appaiono come picchi di un grafico. Né l'elettroforesi bidimensionale, né la spettrometria sono però metodologie «perfette» per la caratterizzazione delle proteine. I gel sono notoriamente molto difficili da gestire e non permettono di distinguere tra proteine molto grandi e molto piccole, né quelle che sono parzialmente immerse in una membrana. La spettrometria di massa, per contro, è costosa (ogni strumento costa oltre 500.000 dollari) e qualche volta non riesce a individuare le proteine.

Numerose aziende stanno però preparando versioni più sofisticate di queste metodologie per impiegarle in ricerche a scala industriale dello stesso ordine di grandezza di quelle che hanno reso possibile il Progetto Genoma umano. Il «cavallo da soma» di quel progetto è stato l'ABI 3700, un sequenziatore di DNA prodotto dalla Applied Biosystems. (Oggi Applied Biosystems fa parte di Applera, che a sua volta comprende Celera Genomics, l'azienda che si alleò con il consorzio pubblico per il completamento della sequenza del genoma umano nel 2000). Lo scorso gennaio, Applied Biosystems ha presentato una nuova macchina basata sulla spettrometria di massa, il Proteomics Analyzer 4700. Contemporaneamente ha annunciato un accordo con PerkinElmer e Millipore per lo sviluppo di un sistema automatico di preparazione e analisi di elettroforesi bidimensionali. I dirigenti della Applied Biosystems sperano che questa automazione possa consentire ai ricercatori di compiere in qualche giorno il lavoro che una volta richiedeva mesi, se non addirittura anni.

Sfortunatamente, il **proteoma** è molto **più complicato** da studiare di quanto non lo sia il genoma

Fabbriche di proteine

Quando si vuole capire quali proteine siano presenti in determinate cellule o tessuti, si utilizzano generalmente due tecniche: l'elettroforesi bidimensionale su gel e la spettrometria di massa (*si veda l'illustrazione a pagina 37*). Nell'elettroforesi bidimensionale si depone un piccolo campione della miscela di proteine sul bordo di un sottile strato di gel in grado di separare le proteine spostandole in due direzioni perpendicolari in base alla loro massa e alla loro carica elettrochimica. Poiché ogni proteina ha una dimensione e una carica caratteristiche, ognuna diventa identificabile come una macchia distinta sul gel. A questo punto si possono prelevare dal gel le singole macchie per identificare con altre tecniche le proteine in esse contenute. Analogamente, si può ricercare in un campione la presenza di proteine prodotte da un determinato tessuto piutto-

Non è ancora chiaro, però, se questi nuovi sistemi costituiranno lo standard della proteomica o meno. «La proteomica è un settore molto innovativo e non ci sarà un unico strumento dominante in quest'industria» avverte Darlene Solomon, responsabile della ricerca e sviluppo nelle scienze della vita per Agilent, uno dei concorrenti di Applera. Nel frattempo aziende come la Myriad Genetics di Salt Lake City, la GeneProt di Ginevra, la Large Scale Biology di Vacaville in California e la MDS Proteomics di Toronto si sono dotate anch'esse di laboratori di proteomica, in alcuni dei quali sono impiegate tecnologie di robotizzazione prese a prestito dall'industria automobilistica. L'anno scorso Myriad annunciò di aver stretto un'alleanza per un valore di 185 milioni di dollari (210 milioni di euro) con Hitachi e Oracle allo scopo di decifrare l'intero proteoma umano nell'arco dei prossimi tre anni. Il programma è cominciato ufficialmente lo scorso gennaio. Per parte sua Celera ha raccolto quasi un miliardo di dollari per i suoi progetti di proteomica. J. Craig Venter ha abbandonato la presidenza della società in gennaio e l'azienda ha annunciato di essere alla ricerca di un nuovo profilo con più esperienza nel campo dello sviluppo dei farmaci. Que-

MDS Proteomics

QUESTA POSTAZIONE DI LAVORO ROBOTIZZATA in una società di proteomica sfrutta anche le tecnologie di assemblaggio utilizzate nell'industria automobilistica. Essa è configurata per automatizzare i lavori ripetitivi, come il pipettaggio e la sostituzione del mezzo di coltura, passi essenziali per ottenere le colture cellulari, un prerequisito per gli studi di proteomica. Altri moduli industriali provvedono all'isolamento e all'identificazione delle proteine, prima di ulteriori studi.

sta mossa è stata interpretata come una indicazione dell'intenzione di Celera di abbandonare un modello di business fondato sulla vendita dell'accesso ai suoi dati di genomica e di proteomica ad altre aziende, per migrare verso un modello in cui svilupperà da sé i farmaci.

Le voci critiche verso questi altisonanti progetti hanno sottolineato che non esiste un unico proteoma umano: le proteine prodotte dal pancreas sono molto diverse da quelle prodotte dal cervello, e molte variabili, come per esempio l'aver bevuto da poco un bicchiere di vino, possono influenzare moltissimo il tipo di proteine prodotte dal corpo umano. «Ogni condizione del nostro organismo, a seconda di quanto siamo malati o di quali farmaci assumiamo - spiega Michael F. Moran, direttore scientifico della MDS Proteomics - corrisponde a un proteoma diverso.»

In altre parole, catalogare le proteine umane ci porta fino a un certo punto. Per capire che cosa realmente facciano le proteine nel corpo e per sviluppare farmaci efficaci, dobbiamo sapere come varia la componente proteica da una cellula all'altra e all'interno della cellula con il mutare delle condizioni circostanti. Dobbiamo inoltre sapere come le diverse proteine collaborino per portare a termine le varie attività della cellula. È proprio questo il campo di ricerca in cui si sono concentrate le attività dell'azienda di Moran, per scoprire come le proteine si aggancino l'una all'altra fino a formare catene di reazioni chimiche o creare meccanismi molecolari come il fuso mitotico che, al momento della divisione cellulare, separa le due cellule. «Le proteine si combinano per formare reti - osserva Moran - e se c'è una cosa da scoprire a proposito di una proteina è con quali altre proteine essa interagisca.»

«Ascoltare» la rete

Nel numero di «Nature» del 10 gennaio i ricercatori della MDS Proteomics e dell'Università di Toronto e quelli di un gruppo indipendente costituito dalla Cellzome e dallo European Molecular Biology Laboratory, entrambi a Heidelberg, in Germania, hanno descritto una nuova strategia per identificare centinaia di interazioni tra proteine nelle cellule di lievito di birra. Il loro approccio prevede l'inserimento di frammenti di DNA codificanti per «etichette» che ade-

I principali attori della proteomica

www.celera.com
Rockville, Maryland, USA

I progetti di proteomica si concentrano sul confronto fra tessuti sani e malati per identificare marcatori di proteine per malattie che potrebbero essere affrontate con anticorpi monoclonali, immunoterapia cellulare o farmaci.

www.cellzome.com
Heidelberg, Germania

Fondata da ricercatori dello European Molecular Biology Laboratory, si dedica alla caratterizzazione di complessi proteici cellulari e sta sviluppando mappe delle interazioni proteiche in diverse condizioni cellulari.

www.curagen.com
New Haven, Connecticut, USA

Opera screening di database genetici per identificare le interazioni tra le proteine e comprendere come i geni si comportino in caso di malattia. Possiede uno dei brevetti chiave per l'identificazione di reti di proteine nel lievito di birra.

www.geneprot.com
sede americana:
North Brunswick, New Jersey, USA

Identifica, caratterizza e sintetizza le proteine umane utilizzate per lo sviluppo di nuove terapie. È il secondo centro di proteomica industriale a essersi stabilito in New Jersey nel 2002.

www.hybrigenics.com
Parigi, Francia

Ha messo a punto una tecnologia per identificare e validare i bersagli per i farmaci su scala industriale. L'obiettivo è di costituire un repertorio di marcatori biologici, micromolecole e prodotti farmaceutici a base di anticorpi.

www.lsbc.com
Vacaville, California, USA

Sta costruendo una serie di database sul proteoma umano che comprendono marcatori proteici utili nella diagnostica e per il monitoraggio di malattie. Ha avviato progetti sia interni sia in collaborazione con altri per lo sviluppo di farmaci.

mds proteomics
www.mdsproteomics.com
Toronto, Canada

Identifica, seleziona e valida i bersagli proteici per terapie a base sia di anticorpi sia di micromolecole. Concentra le sue ricerche sui tumori, particolarmente sui recettori e sui segnali intracellulari che costituiscono la rete di comunicazione all'interno delle cellule.

www.myriad.com
Salt Lake City, Utah, USA

Determina le funzioni di singole proteine e come le proteine formano i complessi che costituiscono i meccanismi enzimatici e i circuiti dei segnali cellulari. Utilizza lieviti modificati geneticamente e tecniche di spettrometria di massa.

www.stromix.com
San Diego, California, USA

Impiega tecnologie ad alta resa per determinare la struttura delle proteine e i bersagli chiave all'interno della famiglia delle proteine. Utilizza tecniche di bioinformatica per «incastrare» virtualmente i candidati farmaci nei siti di legame dei loro bersagli.

www.syrrx.com
San Diego, California, USA

Sviluppa strutture proteiche tridimensionali e le utilizza per la scoperta di nuovi farmaci. La Syrrx Protein Structure Factory ha affiancato strumenti di biologia molecolare alla robotica per determinare la struttura delle proteine su scala industriale.

FONTE: le società interessate

riscono a centinaia di geni di lievito. Ciò permette di isolare le proteine prodotte dai geni modificati, assieme a tutte le proteine che a esse si sono legate, semplicemente rompendo le cellule del lievito e facendo passare la soluzione attraverso una colonna di microsfere in grado di legarsi esclusivamente con le etichette adesive presenti su ogni proteina. Una volta sottoposta la soluzione di proteine a spettrometria di massa e analizzati i risultati, gli scienziati hanno scoperto che più del 90 per cento dei complessi di proteine che avevano isolato conteneva molecole dalle funzioni sconosciute. Come se non bastasse, fino all'80 per cento di queste proteine interagiva con almeno un'altra proteina, a dimostrazione della complessità della rete di interazioni biochimiche all'interno della cellula.

MDS Proteomics intende utilizzare questa tecnica per lo studio del proteoma umano. Poiché il progetto sul proteoma del lievito è stato completato nel giro di alcune settimane, i direttori dell'azienda contano di arrivare alla prima bozza di proteoma umano entro un anno. Non è tuttavia chiaro quale tipo di cellula umana studieranno né in quali condizioni la osserveranno.

Anche il settore della ricerca pubblica, almeno negli Stati Uniti, ha avviato ricerche nel campo della proteomica. Il gruppo di ricerca diretto da Samir M. Hanash dell'Università del Michigan ha fondato la Human Proteome Organization (HUPO), che ha per scopo il coordinamento di progetti di ricerca pubblici sul proteoma, in maniera analoga a come il Progetto Genoma umano raggruppò i laboratori pubblici impegnati nella decodificazione del genoma. Uno dei primi obiettivi della HUPO sarà la determinazione delle proteine presenti nel siero del sangue.

Il National Cancer Institute (NCI) e la Food and Drug Administration (FDA) hanno avviato congiuntamente due distinti progetti di proteomica allo scopo di sviluppare terapie e metodi di diagnosi più sofisticati per i tumori. Nel progetto, annunciato nel luglio 2001, verranno analizzate le proteine presenti nelle cellule tumorali di singoli pazienti per costituire un catalogo delle molecole presenti nelle cellule malate ma non in quelle sane. I ricercatori andranno anche a caccia di «marcatori» delle proteine correlati con tipi di tumore più aggressivi, in vista sviluppare test diagnostici più efficienti.

Emanuel Petricoin, condirettore del programma NCI/FDA, in collaborazione con la Correlogic Systems di Bethesda, nel Maryland, ha recentemente dimo-

Come ricomporre il puzzle della proteomica

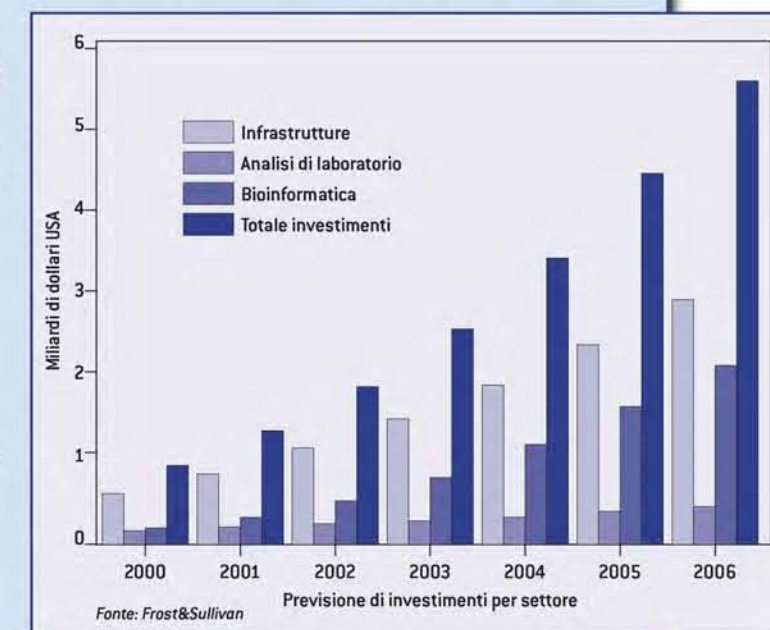
La bioinformatica è lo studio della struttura interna dell'informazione biologica; i suoi strumenti di indagine, oggi in continua evoluzione, rispondono alla necessità di manipolare l'eterogenea massa dei dati di provenienza biomedica facendo uso dei modelli teorici e degli strumenti pratici dell'informatica e della statistica. Tali dati sono voluminosi, complicati e disomogenei, poiché essi non sono il prodotto di un progresso improvviso in un solo ambito, quanto piuttosto della convergenza di settori scientifico-tecnologici diversi e in crescita esplosiva da qualche decennio (genomica e proteomica, ma anche farmacologia, epidemiologia, oncologia, e così via).

La biologia molecolare ha operato con grande successo sulla base di un'ipotesi riduzionistica, separando cioè i processi biologici in meccanismi e costituenti microscopici elementari; il limite di tale approccio consiste nell'incapacità pratica (se non addirittura concettuale) di rimettere insieme i tasselli di un enorme puzzle. Così, se un esperimento mostra che la proteina A interagisce in un certo modo con la proteina B, mentre un secondo esperimento evidenzia come, in certe condizioni, anche la proteina C possa interagire con la proteina B, non abbiamo per ora un metodo per predire come le stesse tre proteine interagiscano all'interno di un network proteomico (se non quello di eseguire un altro esperimento). Questo è, oggi, il collo di bottiglia delle biotecnologie e non certo la penuria dei dati sperimentali!

Si può affermare, infatti, che con la realizzazione dei programmi della genomica e della proteomica i tasselli del puzzle saranno presto tutti disponibili. Non va però dimenticato che i dati raccolti sono a volte difficilmente confrontabili; in generale, dati provenienti da diversi laboratori, anche sulla medesima questione, possono differire a causa delle diverse tecniche sperimentali, delle procedure di validazione e dei format di registrazione adottati. Inoltre, informazioni di cruciale importanza potrebbero emergere dal confronto di dati raccolti in settori della ricerca biomedica caratterizzati da metodologie e finalità apparentemente inconciliabili (come possono essere, per esempio, la psicologia e la biologia dello sviluppo).

La bioinformatica si propone, dunque, di mettere a punto gli strumenti teorico-pratici per manipolare, confrontare e integrare l'impressionante mole dei dati biomedici oggi accessibili, nella convinzione che il carattere sistematico dei dati raccolti a livello microscopico nasconda una chiave di lettura, o struttura interna, per la comprensione delle funzioni macroscopiche dei sistemi biologici. Molte delle competenze necessarie sono disponibili in settori delle scienze esatte ormai maturi (informatica, matematica applicata, fisica computazionale), ma tradizionalmente e culturalmente separati dalle scienze biologiche.

Questo cambiamento di approccio all'informazione biologica è stato ovunque così rapido e inatteso che il mondo accademico è stato colto impreparato. Programmi sperimentali di bioinformatica sono stati finanziati dalle università statunitensi a partire dalla metà degli anni novanta, mentre in Italia una tra le prime iniziative in questo senso è rappresentata dal corso di laurea specialistica (biennale) in bioinformatica attivato quest'anno dalla Facoltà di scienze e tecnologie dell'Università di Camerino in collaborazione con alcune grosse industrie farmaceutiche nazionali ed europee. La sfida consiste nell'attrezzare uno studente con buona preparazione in genetica e biotecnologie a utilizzare autonomamente tecniche informatiche avanzate per l'elaborazione dell'informazione biologica (o viceversa, introdurre un giovane informatico nel mondo affascinante, ma per lui ostico, della proteomica).

La totale assenza di adeguate figure professionali in ambito bioinformatico è così sentita in alcuni settori dell'industria farmaceutica e delle biotecnologie (e lo sarà presto nel settore

clinico-ospedaliero), che il problema è stato recentemente dibattuto anche dalla stampa quotidiana nazionale. La stessa fonte citata nell'articolo prevede che dei 5,6 miliardi di dollari che nel 2006 saranno investiti a livello mondiale in strumentazione e servizi legati alla proteomica, ben 2.2 saranno spesi proprio in programmi di bioinformatica finalizzati principalmente all'ingegnerizzazione del farmaco e alla diagnosi proteomica.

In conclusione, e volutamente un po' a effetto, possiamo riassumere l'obiettivo della bioinformatica dicendo che, se la genomica e la proteomica ci hanno aperto il libro della vita, sarà compito della bioinformatica cercare di decifrarlo.

FABIO MARCHESONI
Coordinatore del programma di bioinformatica, Dipartimento di fisica, Università di Camerino

LA CRISTALLOGRAFIA A RAGGI X richiede la produzione di un cristallo puro della proteina da studiare. Qui un cristallo di CD4, una proteina sfruttata dal virus dell'AIDS per infettare le cellule del sistema immunitario, è posto all'interno del tubicino sigillato con una sferetta di cera. Il tubicino verrà bombardato con raggi X per ottenere una figura di diffrazione dalla quale gli scienziati possono determinare la struttura tridimensionale di una singola molecola della proteina.

Kay Chernush

strato le possibilità di un approccio proteomico alla diagnosi dei tumori. In uno studio pubblicato sul sito di «Lancet» lo scorso 8 febbraio, i ricercatori hanno descritto come sono riusciti a confrontare l'organizzazione delle proteine presenti nel sangue di pazienti con un tumore ovarico con quelle di individui sani. Grazie a questo tipo di confronto sono riusciti a identificare tutte e 50 le pazienti con il tumore, ottenendo inoltre soltanto tre falsi positivi nel campione di donne sane.

Cataloghi e mappe delle interazioni tra le proteine rappresentano però solo due terzi della proteomica, e determinare la forma delle proteine è altrettanto importante. La metodologia tradizionale prevede la cristallografia a raggi X, che consente di analizzare proteine preventivamente purificate e cristallizzate. Esaminando in che modo i raggi X vengano deflessi dai singoli atomi di una proteina, si può comprendere come sia fatta la molecola e disegnarne la conformazione tridimensionale.

Che cosa ci darà il futuro

Fino a poco tempo fa la cristallografia a raggi X era un settore minore, e aveva bisogno dell'accesso a un fascio di raggi X emesso da un sincrotrone (tant'è che si parla di «luce di sincrotrone»). Questi enormi apparecchi sono tradizionalmente usati dai fisici per studiare le particelle subatomiche, e i raggi X sono prodotti nel processo di accelerazione delle particelle. I laser a raggi X hanno però permesso di sviluppare dispositivi da tavolo utilizzabili anche nei normali laboratori.

Due aziende di San Diego, la Syrrx e la Structural GenomiX (SGX), hanno emancipato la cristallografia a raggi X fino a renderla industriale. «Oggi è tutto robotizzato» spiega Nathaniel David, fondatore e direttore dello sviluppo dei prodotti della Syrrx. Come molte aziende che hanno automatizzato i processi per lo studio delle proteine, Syrrx ha preso in prestito dall'industria automobilistica molte tecnologie. Per automatizzare i 10.000 metri quadrati di laboratori, dove tutto avviene come in una catena di montaggio, dalla purificazione delle proteine alla loro cristallizzazione, ci si è avvalsi della consulenza di specialisti della General Motors. Oltre a laser a raggi X la Syrrx dispone di una sua linea di luce dedicata presso l'Advanced Light Source del Lawrence Berkeley Laboratory. Structural GenomiX ha stretto un accordo simile con l'Advanced Photon Source dell'Argonne National Laboratory, dove a sua volta dispone di una linea di luce.

Questa informazione sulla struttura delle proteine promette di essere molto redditizia. L'inglese Oxford GlycoSciences conta di potersi assicurare i brevetti su buona parte delle sequenze di DNA che compongono il genoma umano mediante l'utilizzo di dati di genomica e di proteomica. Lo scorso dicembre l'azienda ha presentato domande di brevetto per 4000 proteine umane. Questo tipo di richieste potrebbe mutare profondamente la definizione di proprietà intellettuale in campo biotecnologico. In passato si avanzava una richiesta di brevetto su sequenze di DNA e sulla singola proteina da questa codificata. Ma poiché lo stesso gene può presiedere alla sintesi di più proteine, una richiesta di brevetto basata sulla proteina stessa potrebbe avere più valore e addirittura permettere di aggirare i brevetti sulle sequenze di DNA già in mano ai concorrenti. Se questo sarà il caso, i tribunali saranno un'ulteriore scena che le proteine ruberanno ai geni.

BIBLIOGRAFIA

SERVICE ROBERT F., *High-Speed Biologists Search for Gold in Proteins*, in «Science», 294, pp. 2074-2077, 7 dicembre 2001.

SENDER AARON J., *Separation Anxiety: Why Proteomics Can't Let Go of 2D Gels*, in «Genome Technology», n. 16, pp. 34-39, dicembre 2001.

Per un glossario sulla proliferazione dei termini di biotecnologia con suffissi in «-ome» e in «-omica»: www.genomicglossaries.com/content/omes.asp

Proteine da CARTOLINA

di Sergio Pistoi

In fase di sperimentazione la proteina - scoperta negli abitanti di Limone sul Garda - che protegge dall'aterosclerosi

Idee in fuga

Il nostro paese ci ha messo i geni, quelli preziosi contenuti nel DNA dei limonesi, e anche il genio, quello dei ricercatori che li hanno individuati e studiati. Ma i vantaggi economici della scoperta, se mai ci saranno, ricadranno lontano dalla ricerca italiana.

La storia della Apo-AI Milano è un successo della ricerca di base *made in Italy*, ma anche un esempio di come molte scoperte si concretizzino poi in applicazioni e imprese redditizie solo al di fuori dei confini nazionali.

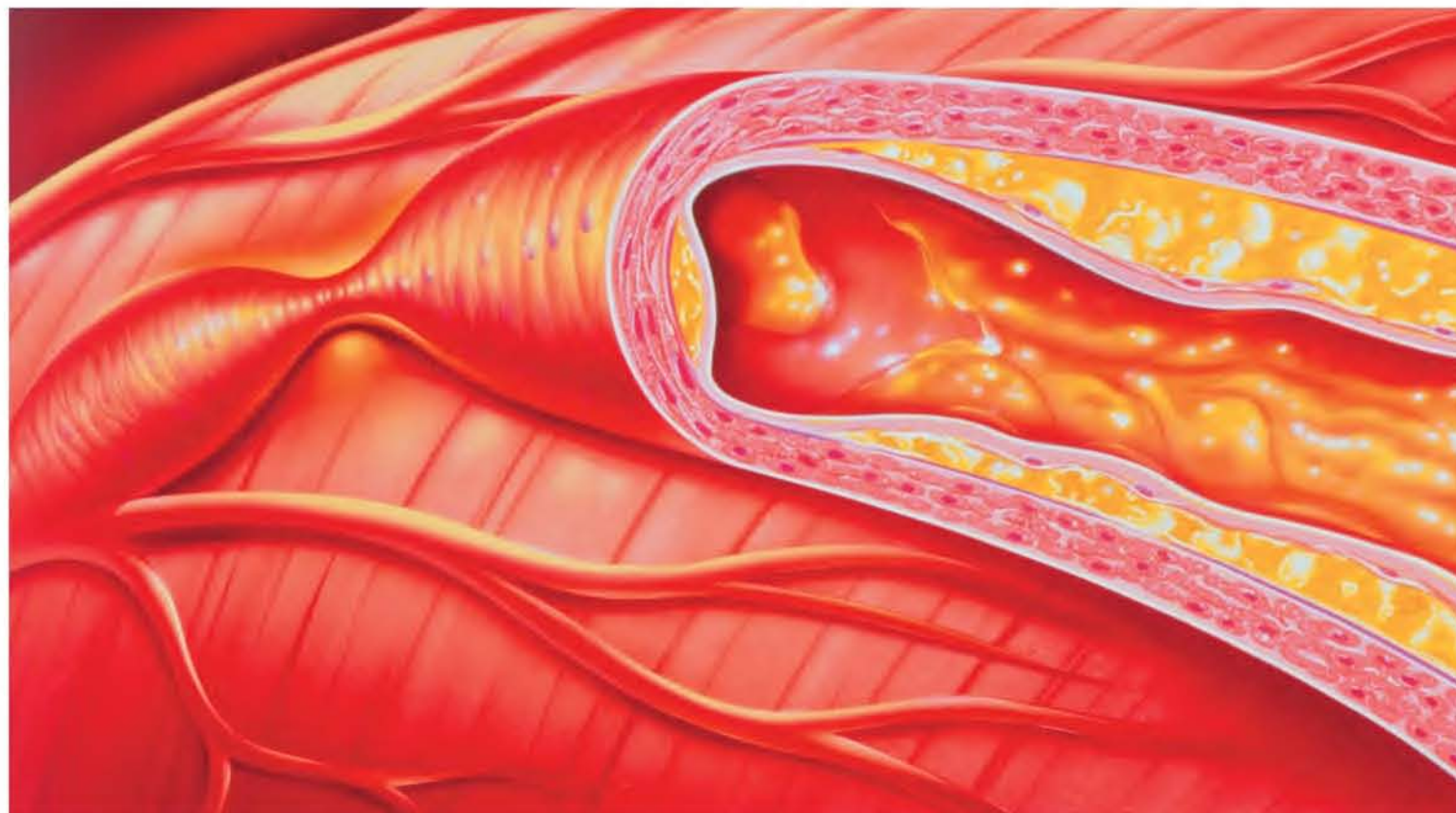
Sirtori e Franceschini, assieme alla multinazionale svedese Pharmacia, sono titolari del brevetto che copre il processo di produzione e purificazione della proteina mutante, che è stato poi concesso in licenza alla statunitense Esperion. «In Italia non abbiamo trovato nessuno disposto a investire nella messa a punto del processo» racconta Sirtori. Che aggiunge: «L'Università non ha mai neanche pensato di brevettare la procedura; l'ho fatto io a titolo personale con i soldi di mia madre».

Certo, stiamo parlando degli anni ottanta, oggi preistoria in termini di brevetti biotech, ma la situazione sembra migliorata di poco, se è vero - come dice Sirtori - che ancora oggi in un ateneo importante come quello milanese i corsi di laurea in biotecnologie non prevedono neanche una lezione di brevettistica. Senza contare i recenti rapporti della Commissione Europea, che piazzano l'Italia agli ultimi posti per quantità di brevetti e investimenti in *venture capital*, cioè fondi «scommessi» in progetti innovativi e ad alto rischio.

Le ambizioni nazionalistiche non c'entrano: in ballo, piuttosto, c'è la sopravvivenza del nostro sistema di ricerca. Un sorprendente rapporto del MIT rivela per esempio che una parte consistente del *budget* di ricerca delle grandi università statunitensi deriva ormai dai proventi saggiamente amministrati di brevetti e *royalties*. La prestigiosa Columbia University, per esempio, finanzia un terzo delle sue spese di ricerca grazie ai ricavi di tre soli brevetti biotech di successo. Nessuno può sapere se davvero dalla scoperta di Sirtori e dei suoi colleghi scaturirà una cura rivoluzionaria ed efficace. Quello che è certo è che, comunque, di questi successi alla ricerca tricolore tornerà indietro ben poco.

John Bavosi / SPL / Grazia Neri

FORMAZIONI DI PLACCA ATEROSCLEROTICA su un ramo di una coronaria. La proteina Apo-AI Milano si è dimostrata in grado non solo di impedire l'accumulo di placca, ma anche di sciogliere le placche già formate, restituendo ai vasi la normale funzionalità e prevenendo gli eventi cardiovascolari.

Gli abitanti di Limone sul Garda non vanno fieri solo del prezioso centro storico e delle profumate coltivazioni di agrumi della loro cittadina lacustre, ma anche del loro DNA. Anni fa un gruppo di ricercatori italiani scoprì infatti che nel patrimonio genetico di molti limonesi è scritta una ricetta tuttora unica al mondo, in grado di preservare l'organismo dall'eccesso di colesterolo. E proprio da questa scoperta potrebbe nascere un rivoluzionario farmaco contro l'aterosclerosi, da poco entrato nella sperimentazione clinica. Per raccontare la vicenda dobbiamo fare un passo indietro nel tempo. È il 1975 quando il signor D., un ferroviere originario di Limone, si presenta a una visita di controllo a Milano.

Ai medici che esaminano le sue analisi del sangue sembra quasi impossibile che il paziente sia ancora vivo e vegeto davanti a loro. Non solo i suoi livelli di trigliceridi sono alle stelle, ma anche i valori di HDL - il colesterolo «spazzino» che elimina l'eccesso di grassi dal sangue - è di tre o quattro volte inferiore alla norma. Una combinazione infausta che, secondo tutte le casistiche, avrebbe già dovuto riempire di placche le arterie dell'ignaro ferroviere, causandogli seri problemi cardiaci. Ancora più grande è la sorpresa dei medici quando arrivano i risultati degli esami clinici: non solo il signor D. ha un cuore di ferro, ma le sue arterie non mostrano alcun segno di danno, nonostante abbia abbondantemente superato la quarantina. Dato ancora più interessante, anche il padre e i figli del fortunato paziente presentano lo stesso incredibile fenomeno.

Fra i medici che visitano il signor D. ci sono Cesare Sirtori e il suo collega Guido Franceschini dell'Università di Milano che, incuriositi dallo strano fenomeno, decidono di vederci chiaro. Siamo negli anni ottanta e i due, armati di provette e di molta pazienza, iniziano ad analizzare il migliaio di abitanti di Limone, trovandone almeno 40 con le stesse paradossali caratteristiche. Tutti parenti alla lontana del loro primo paziente - dato l'isolamento e l'altissimo grado di consanguineità di quella piccola popolazione - e, come lui, dotati di cuore e arterie a prova di bomba, nonostante il loro sangue sia ricco di grassi e povero di HDL.

Sirtori e i suoi colleghi arrivano perfino a scartabellare negli archivi delle parrocchie per risalire agli alberi genealogici delle poche famiglie della cittadina, fino a risalire al capostipite della famiglia, un certo Giovanni Pomaroli, nato nel 1780. È da lui, ipotizzano i ricercatori, che ha avuto origine la mutazione genetica che protegge dalle insidie del colesterolo. Una mutazione inutile e perfino controproducente per chi, come il buon Pomaroli, avrà vissuto del sano ma scarso vitto di due secoli fa, ma che si è trasformata in un toccasana per i suoi moderni e ipernutriti discendenti.

Dopo cinque anni di lavoro, insieme con un gruppo di colleghi statunitensi, gli studiosi italiani scoprono così che tutti i successori di Pomaroli possiedono una mutazione nel gene che serve a produrre la proteina ApoA-I, il costituente fondamentale delle HDL. Rispetto alla versione normale, quella mutata, battezzata Apo-AI Milano (AIM), differisce di un solo «mattoncino», o amminoacido.

Ben presto nei ricercatori italiani si fa strada l'ipotesi che copiando il genoma dei limonesi si potranno forse creare nuovi e più potenti farmaci contro l'aterosclerosi, le cui complicanze rappresentano la prima causa di morte nei paesi occidentali. L'aterosclerosi consiste nella formazione di «placche» di colesterolo e cellule che ostruiscono le arterie e possono rompersi causando trombosi, infarto, ictus. I farmaci attualmente disponibili - come le statine - abbassano la produzione di colesterolo, ma nessun prodotto è oggi in grado di sciogliere le placche già formate, proprio quello che l'AIM sembra in grado di fare.

L'altra fondamentale svolta avviene nei primi anni novanta quando - in collaborazione con una casa farmaceutica svedese - i ricercatori trasferiscono una versione del gene mutato in batteri, «costringendoli» a produrre una copia artificiale della proteina AIM. «Il sistema per produrre la proteina in quantità elevata e in forma pura è stato un vero e proprio "collo di bottiglia", e ha richiesto enormi investimenti» racconta Sirtori.

Non passa molto tempo prima che i ricercatori d'oltreoceano si interessino alla scoperta. Nel 1994 P. K. Shah, cardiologo del Cedars-Sinai, in California, sperimenta la AIM su conigli resi ipercolesterolemici, un modello di studio standard che riproduce con buona approssimazione l'aterosclerosi umana, e ottiene una riduzione fino al 70 per cento delle placche. Parallelamente, i ricercatori italiani accumulano risultati altrettanto incoraggianti, «Nei nostri conigli la AIM ha sciolto la maggior parte delle placche nel giro di due o tre giorni» conferma Sirtori.

Aiutati dai progressi nella proteomica - lo studio della struttura e della funzione delle proteine - i ricercatori raccolgono anche importati indizi sul perché le AIM siano così efficaci, circa il doppio della loro controparte normale, nel rimuovere il colesterolo. A causa della mutazione, le AIM tendono a legarsi a due a due, formando coppie stabili, cosa che non succede per la versione normale. «In qualche modo questo fenomeno aumenta il loro tempo di permanenza nel sangue e la loro efficacia» spiega ancora Sirtori.

Arriviamo così ai giorni nostri. Nel 2000, sull'onda del successo degli studi sugli animali, una piccola società biotech statunitense, la Esperion Therapeutics, di cui Sirtori è consulente e cofondatore, riesce a raccogliere gli ingenti capitali necessari per portare avanti la sperimentazione clinica della AIM. Pochi mesi fa, dopo un primo trial su volontari sani che ha stabilito la sicurezza e la tollerabilità della AIM per via endovenosa, la Esperion ha così ottenuto l'autorizzazione per un primo studio in «doppio cieco» su 50 pazienti affetti da malattia delle coronarie, per valutare l'efficacia della AIM nel ridurre le placche aterosclerotiche che sono all'origine della patologia. I primi risultati saranno disponibili entro fine anno.

Per ora, i più contenti sono sempre i fortunati discendenti di Pomaroli, che si possono ingozzare di dolci senza rischi per le coronarie, mentre si godono l'inaspettata fama che il DNA ha regalato al loro incantevole paesino.

Bagliori dalla MATERIA OSCURA

Nonostante gli sforzi degli astronomi, gran parte della materia dell'universo continua a sfuggire alle loro osservazioni. E non sappiamo nemmeno di che cosa sia fatta

di Patrizia Caraveo e Marco Roncadelli

European Southern Observatory

L'ASTRONOMIA di Raffaello (1508), affresco che orna la Stanza della Segnatura nei Palazzi Vaticani, raffigura il cielo di Roma al momento dell'ascesa al soglio pontificio di papa Giulio II. Nell'immagine ottenuta dal Very Large Telescope dell'ESO (*a fianco*), è chiaramente visibile l'arco blu prodotto dall'effetto di lente gravitazionale su una galassia dell'ammasso CL2244-02.

Oggi, come 10.000 anni fa, l'uomo si pone domande sull'universo che lo circonda. Come si è formato, qual è la sua struttura, di che cosa è fatto? Una volta il problema era di competenza dei filosofi. Oggi rispondere a queste domande è privilegio degli astronomi, che utilizzano gli osservatori più potenti e i rivelatori più sensibili per sondare le profondità del cielo. I risultati di lavori lunghi e minuziosi sono, a volte, stupefacenti. Teorie accettate possono essere rimesse in forse da una nuova evidenza sperimentale. Non a caso i cosmologi sono «sempre in errore, mai in dubbio». A parte le battute, agli scienziati viene richiesta oggettività di giudizio unita a una buona dose di inventiva e di capacità di mettersi sempre in discussione. L'infinitamente grande cerca la sua spiegazione nell'infinitamente piccolo, e l'astronomia si fonde con la fisica delle particelle elementari, regalando all'umanità una delle più affascinanti avventure del pensiero.

Per capire come e di che cosa sia fatto l'universo gli astronomi devono fare accurati lavori di censimento degli oggetti celesti, cercando di misurarne la distanza e di assegnare loro una massa. In questo sono aiutati dalla meravigliosa semplicità delle leggi della fisica, che noi supponiamo si applichino a tutto l'universo. Le sorprese, per fortuna, vengono subito a ricordarci che siamo molti lontani dall'avere le idee chiare. Se pensiamo che studiare il cosmo attraverso l'astronomia radio, ottica, X e gamma possa fornirci un quadro completo del nostro universo ci sbagliamo grossolanamente. Da decenni sappiamo che la materia luminosa - quella che «vediamo» perché emette radiazione elettromagnetica, cioè luce, onde radio, raggi X e gamma - è solo una frazione insignificante di tutta la materia che esercita un'azione gravitazionale. Questo è il famoso problema della «materia oscura», una delle sfide più entusiasmanti dell'astrofisica attuale.

Materia oscura è certamente un nome evocativo, visto che stiamo parlando di qualcosa che è contemporaneamente di natura ignota e di difficile individuazione. Non diversamente dai buchi neri, la materia oscura sfugge alle nostre osservazioni dirette. Sappiamo con certezza che c'è soltanto perché ne vediamo gli effetti sulla materia luminosa.

Iniziamo allora chiedendoci come ci si possa rendere conto dell'esistenza della materia oscura. La risposta non è univoca, poiché si applicano metodologie diverse secondo gli oggetti che si considerano. Alcune di queste saranno descritte in seguito, ma vogliamo sottolineare fin d'ora che parte di ciò che diremo si basa su una scoperta di Christian Doppler. Nel 1842 egli osservò che il suono emesso da una sorgente in movimento appare, a un osservatore fermo, di frequenza superiore quando l'oggetto si avvicina e di frequenza inferiore se l'oggetto si allontana. È il famoso effetto Doppler, valido per qualunque fenomeno ondulatorio, dal fischio di un treno in corsa alla radiazione elettromagnetica. Se applicato alle righe presenti negli spettri degli oggetti celesti, esso permette di determinare la velocità della sorgente di radiazione rispetto a noi.

Ma procediamo con ordine, esaminando prima le singole galassie, per poi passare agli ammassi di galassie e quindi all'intero universo osservabile.

La massa delle galassie

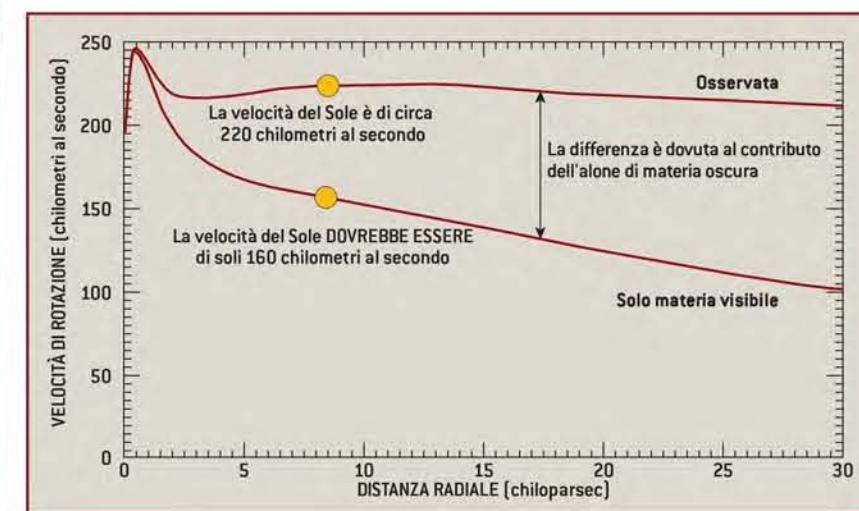
In prima approssimazione, l'astronomia stima la massa di una galassia in base alla sua luminosità: galassie più luminose contengono più stelle, e quindi sono più massicce di quelle meno luminose. Si ha così una misura diretta della massa luminosa delle galassie. Esistono però altri metodi, più generali, per valutare la massa complessiva di una galassia: essi sfruttano il movimento di rotazione che coinvolge tutte le sue stelle, tipico delle «galassie a spirale». Non diversamente dai pianeti del sistema solare, le stelle e le nubi di gas che compongono tali galassie sono animate da un moto di rotazione e descrivono orbite più o meno circolari intorno al centro. In questo moto la velocità di ogni stella dipende, oltre che dalla distanza dal centro, dalla frazione di massa galattica presente all'interno della sua orbita. Quindi lo studio sistematico di tali moti ci permette di misurare la massa complessiva delle galassie a spirale. Il grafico delle velocità misurate in funzione della distanza dal centro è chiamato curva di rotazione galattica.

Esaminando gli spettri di parecchie stelle di una galassia a spirale, selezionate in modo da avere distanze progressivamente crescenti dal centro, ci aspettiamo di trovare che la curva di rotazione dapprima cresca, all'aumentare della distanza dal centro, e poi, una volta inglobata tutta la massa della galassia, diminuisca. In altri termini, ci aspettiamo che le stelle ai bordi della galassia si muovano più lentamente di quelle più interne, in analogia con quanto avviene per i pianeti del sistema solare. Invece la natura ci riserva una sorpresa: dopo una crescita lineare - in corrispondenza della regione centrale - la curva di rotazione si stabilizza su un valore costante all'aumentare della distanza dal centro. Benché sia impossibile trovare due galassie con curve di rotazione identiche, è sorprendente constatare che praticamente tutte le curve di rotazione misurate hanno lo stesso andamento qualitativo. Cosa si nasconde dietro questo comportamento?

Per spiegare la curva di rotazione piatta delle galassie a spirale dobbiamo supporre che nelle loro regioni esterne esista una significativa quantità di materia non luminosa, in grado di compensare la diminuzione della velocità che ci aspetteremmo dalla sola materia luminosa. Com'è distribuita la materia oscura? Sfortunatamente le osservazioni non ci permettono di dare una risposta univoca. Dobbiamo procedere a ritroso, ipotizzando diverse distribuzioni di materia oscura e studiando l'andamento delle corrispondenti curve di rotazione. Si ha il comportamento piatto osservato supponendo che la componente luminosa di una galassia a spirale sia circondata da un alone sferoidale di materia oscura. Nel caso della Via Lattea - che è una tipica galassia a spirale brillante - la materia oscura viene stimata intorno a 10^{12} masse solari, che va confrontata con una massa luminosa di 7×10^{10} masse solari. Ciò significa che la quantità di materia oscura è almeno 10 volte superiore a quella della materia luminosa.

LA GALASSIA DI ANDROMEDA (*in alto*), è uno spettacolare esempio di galassia a spirale. La curva di rotazione (*qui sopra*) evidenzia come il valore della velocità cresca fino a un massimo, per poi diminuire. Al contrario delle attese, però, procedendo verso il margine esterno la velocità si attesta su un valore costante. Il fenomeno si spiega ipotizzando che in quelle regioni si trovi una grande quantità di materia non luminosa. Lo stesso accade per le altre galassie a spirale, come la nostra Via Lattea.

IN SINTESI

- La materia luminosa, quella che emette radiazione elettromagnetica, è solo una frazione insignificante di tutta la materia presente nell'universo.
- Studiando le galassie a spirale, si osserva che la velocità di rotazione delle stelle situate nelle parti esterne è maggiore del previsto. Ciò è giustificabile solo supponendo che in queste regioni sia presente una grande quantità di materia non luminosa.
- Anche l'indagine degli ammassi di galassie conferma, sia attraverso la spettroscopia ottica sia osservando gli effetti di lente gravitazionale, la presenza di materia che sfugge all'osservazione diretta.
- Secondo le osservazioni della missione Boomerang, il parametro che misura la densità cosmica dovrebbe essere uguale a 1, ma la materia ordinaria (luminosa e non) contribuisce appena per il 5 per cento.
- Gli astronomi hanno proposto diversi candidati come possibili costituenti della materia oscura: tra essi stelle non luminose, come le nane brune, le evanescenti WIMPs e un'esotica forma di materia chiamata «quintessenza».

CONFRONTO TRA LA CURVA DI ROTAZIONE MISURATA DELLA VIA LATTEA (*in alto*) e quella che ci saremmo aspettati se la galassia fosse costituita dalla sola materia visibile. La velocità del Sole, in questo caso, sarebbe solo di 160 chilometri al secondo. La materia non luminosa, responsabile di questa discrepanza, è stimata in 10^{12} masse solari, contro le 7×10^{10} masse solari di quella luminosa.

Il problema degli ammassi

L'esistenza di materia oscura negli ammassi di galassie è nota fin dal 1933, quando Fritz Zwicky studiò i moti nell'ammasso di galassie nella costellazione che porta il poetico nome di Chioma di Berenice. Possiamo riassumere così la sua strategia: in un sistema autogravitante isolato (quale un ammasso) vale il teorema del viriale, secondo il quale l'energia potenziale gravitazionale del sistema (proporzionale alla sua massa complessiva) deve essere uguale al doppio dell'energia cinetica totale dei costituenti (le galassie nel caso degli ammassi). Lo si può capire in modo intuitivo: se dominasse l'energia cinetica, il sistema si espanderebbe, mentre – in caso contrario – tenderebbe a collassare; una condizione di equilibrio è possibile solo se l'energia cinetica è metà dell'energia potenziale. La velocità delle galassie che compongono l'ammasso è calcolabile sulla base dello spostamento Doppler delle righe presenti negli spettri galattici, per cui è immediato stimare la massa complessiva. Nel caso di Chioma si trova una massa totale di $9,6 \times 10^{14}$ masse solari, contro una massa luminosa di $1,4 \times 10^{13}$ masse solari. Dunque la quantità di materia oscura è 60 volte maggiore di quella della materia luminosa.

Alla stessa conclusione si può giungere per una via diversa,

sfruttando l'emissione di raggi X degli ammassi. Negli anni settanta si è scoperto che gli ammassi di galassie emettono raggi X con energia dell'ordine di 10 chiloelettronvolt. Lo studio dello spettro della radiazione X ha anche chiarito l'origine di tale emissione. Si tratta della radiazione di *Bremsstrahlung* (letteralmente «radiazione di frenamento») che gli elettroni di un gas ionizzato emettono quando vengono accelerati (decelerati) dal campo elettrostatico di uno ione del gas. Tale scoperta ha dimostrato che gli ammassi di galassie contengono anche un gas ionizzato - alla temperatura di circa 10 milioni di gradi - la cui massa risulta essere di circa 10^{14} masse solari, quindi ben maggiore della massa luminosa. Ma questa scoperta ha un'implicazione ancora più importante. Dallo studio dell'emissione X è possibile concludere che la quantità complessiva di materia presente nell'ammasso è in accordo con le stime ottenute utilizzando il teorema del viriale.

Un'ulteriore conferma è stata ottenuta recentemente attraverso l'effetto di lente gravitazionale. Secondo la teoria einsteiniana della gravità, una distribuzione di massa provoca la curvatura dello spazio. La propagazione della luce viene quindi distorta in presenza della materia, che agisce come una lente moltiplicando, ingrandendo o deformando l'immagine della sorgente. Dopo i primi studi di sorgenti puntiformi, le cui immagini risultavano moltiplicate dalla presenza di una galassia sulla linea di vista, sono state osservate distorsioni dell'immagine di una sorgente estesa. Le galassie vengono deformate e lo studio della deformazione permette di determinare la massa della lente gravitazionale. Immagini di ammassi di galassie hanno evidenziato la presenza di parecchie galassie distorte, non appartenenti a essi. Si tratta di galassie che fanno da sfondo all'immagine, molto più lontane da noi dell'ammasso in questione. La loro luce viene deflessa dall'ammasso che trova sul suo cammino e ciò permette di avere una stima della massa complessiva di molti ammassi.

L'universo

Informazioni importanti su quantità e qualità della materia oscura si ottengono dallo studio delle proprietà globali dell'universo. Dobbiamo quindi fare una breve incursione nel campo della cosmologia, utilizzando il modello cosmologico standard, che emerge dalla teoria einsteiniana della gravità sotto l'ipotesi che lo spazio sia omogeneo e isotropo. Evidentemente tali proprietà si riferiscono a osservazioni effettuate su scala cosmica, di gran lunga maggiore delle dimensioni di un ammasso di galassie.

Secondo il modello cosmologico standard, l'universo è uno spazio con curvatura costante, che può unicamente espandersi o contrarsi durante la sua evoluzione. Ma se lo spazio è omogeneo e isotropo, non può esistere alcun «centro dell'universo» rispetto al quale avvenga l'espansione o la contrazione. Questo apparente paradosso può essere compreso immaginando che l'universo sia simile alla superficie di un pallone che venga gonfiato o sgonfiato. La superficie esterna del pallone è l'analogo bidimensionale di uno spazio a curvatura costante positiva, mentre quella interna corrisponde a uno spazio a curvatura negativa.

L'universo si è espanso fin dalla sua origine nel big bang, avvenuto intorno a 15 miliardi di anni fa: e tale espansione si manifesta nel moto di allontanamento reciproco delle galassie ipotizzato da Edwin Hubble nel 1929. Nell'ambito del modello cosmologico standard, l'espansione cosmica è sempre decelerata, a causa dell'attrazione gravitazionale fra gli oggetti che lo compongono. Sia la geometria dell'universo sia la sua evoluzione dipendono dalla quantità di materia che esso contiene. È conveniente esprimere la corrispondente densità cosmica media in termini del parametro di densità cosmica Ω, definito come il rapporto tra la densità misurata e la cosiddetta «densità critica», caratteristica di un universo a curvatura nulla, cioè descritto dalla geometria euclidea che ben conosciamo. Se la densità media è bassa rispetto a quella critica, si ha $\Omega < 1$: la curvatura spaziale è negativa e l'espansione continuerà per sempre. Viceversa, se la densità media è maggiore di quella critica, $\Omega > 1$: la curvatura è positiva e a un certo momento l'universo inizierà a contrarsi, fino a raggiungere uno stato singolare simmetrico al big bang. Una terza possibilità corrisponde al caso $\Omega = 1$. In questo caso la densità media è esattamente uguale a quella critica: allora l'universo è spazialmente piatto - cioè euclideo - e il tasso di espansione si ridurrà progressivamente a zero.

Quanta materia c'è, nell'universo?

Cominciamo col censire tutta la materia luminosa. Si tratta di atomi simili a quelli dei quali siamo fatti noi, costituiti da protoni e neutroni, che tecnicamente sono chiamati barioni. La densità dei barioni luminosi corrisponde a un valore di Ω non superiore a 0,005. Tuttavia abbiamo visto che la materia oscura gioca un ruolo preponderante sia a livello delle galassie sia dei loro ammassi. Dobbiamo quindi trovare una strategia per valutare la densità di tutta la materia, indipendentemente dal fatto che la «vediamo» oppure no.

L'ESISTENZA DI MATERIA OSCURA NEGLI AMMASSI DI GALASSIE, come l'ammasso della Vergine, riprodotto in questa fotografia, fu dedotta già nel 1933 in base allo studio delle velocità delle galassie appartenenti all'ammasso. Il fenomeno è stato poi confermato con le osservazioni dei raggi X emessi dagli ammassi.

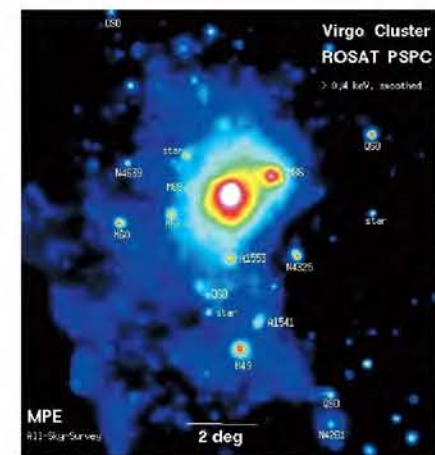
GLI AUTORI

PATRIZIA CARAVEO si è laureata in fisica all'Università di Milano nel 1977. Dopo un periodo al Goddard Space Flight Center della NASA e al Centre d'Etudes Atomiques di Saclay, è approdata all'Istituto di fisica cosmica del CNR di Milano. Ha collaborato a missioni spaziali internazionali dedicate all'astrofisica delle alte energie ed è coinvolta nella missione europea Integral, in quella della NASA Swift e in quella italiana AGILE, che partiranno tra il 2002 ed il 2003. MARCO RONCADELLI si è laureato in fisica all'Università di Pavia nel 1978 ed è stato allievo del Collegio Ghislieri. Ha svolto attività di ricerca presso il Max-Planck-Institut di Monaco di Baviera, il CERN, l'ICTP di Trieste e la Scuola Normale Superiore di Pisa. Attualmente lavora all'INFN a Pavia. Si è occupato di questioni fondamentali della meccanica quantistica, di fisica teorica delle particelle elementari e di astrofisica della materia oscura.

Gli «abitanti» più elusivi dell'universo

Le WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*) sono nuove particelle elementari predette da varie estensioni del modello di Glashow-Weinberg-Salam, che descrive le interazioni forti, deboli ed elettromagnetiche fra particelle elementari. La classe più promettente di questi modelli è costituita dalle teorie di superstringa. A causa della loro debole interazione con la materia ordinaria, le WIMPs presenti nella Via Lattea sono di difficile individuazione. Per di più, il loro effetto all'interno di un rivelatore può facilmente essere confuso con l'interazione prodotta dai neutroni dei raggi cosmici. Al fine di eliminare questi ultimi, gli esperimenti vengono condotti sotto una montagna o sottoterra. Un tale esperimento - chiamato DAMA e attualmente in corso nel Laboratorio Nazionale del Gran Sasso dell'Istituto nazionale di fisica nucleare (INFN) - ha osservato un segnale consistente con quanto ci si aspetta per le WIMPs.

Tuttavia soltanto dopo un'eventuale conferma da parte di altri esperimenti (alcuni dei quali saranno condotti al Gran Sasso) sapremo se le WIMPs sono state effettivamente scoperte. Un metodo indiretto per la rivelazione delle WIMPs si basa sull'individuazione di particelle in cui esse si annichilano, quali neutrini di alta energia, antiprotoni, positroni e raggi gamma. Va detto infine che il metodo concettualmente più semplice per dimostrare l'esistenza delle WIMPs è di produrle in laboratorio, ma per farlo è necessario attendere l'entrata in funzione del Large Hadron Collider del CERN di Ginevra, che sarà operativo non prima del 2006. Va però sottolineato che quest'ultima strategia non sostituisce gli esperimenti sotterranei, perché la rivelazione *in loco* resta l'unico modo per conoscere la rilevanza astrofisica delle WIMPs.

L'AMMASSO DELLA VERGINE in un'immagine ai raggi X prodotta dal satellite ROSAT. Lo studio delle emissioni X degli ammassi ha mostrato che essi contengono gas ionizzato in quantità pari a circa 10^{14} masse solari, un valore superiore alle stime della massa della materia luminosa.

H. Böhringer, U.G. Briel, R.A. Schwarz, W. Voges, G. Hartner e J. Trümper/ROSAT

Lo studio della radiazione cosmica di fondo, che permea l'universo come resto fossile del big bang, ci offre la possibilità di misurare Ω. Solo di recente si è raggiunta una precisione strumentale tale da permettere di decodificare la grande quantità di informazioni che la radiazione cosmica di fondo ci offre sulle proprietà globali dell'universo. In particolare, i dati raccolti dalla missione Boomerang implicano $\Omega = 1$. Si tratta di un risultato di straordinaria importanza, perché da un lato ci dice che viviamo in un universo euclideo, dall'altro che la materia luminosa è insignificante rispetto a quella invisibile. Gli stessi dati possono anche essere utilizzati per stimare la densità di tutti i barioni: essa corrisponde a un valore di Ω pari a circa 0,05 (questo risultato trova conferma nella teoria della nucleosintesi basata sul modello cosmologico standard).

La conclusione è sconvolgente: da un lato, il 95 per cento della massa dell'universo è costituita da materia oscura non barionica. Dall'altro, il 90 per cento dei barioni è oscuro. Che forma assumono i barioni oscuri? Ma, soprattutto, di che cosa è fatto il resto dell'universo, ovvero la maggior parte della materia? Si tratta di un ulteriore, gravissimo colpo all'antropocentrismo.

Quattro secoli fa abbiamo dovuto accettare di non essere al centro del cosmo. Ora scopriamo di essere fatti di una materia che costituisce una minuscola frazione dell'universo che ci circonda.

WIMPs e quintessenza

Un costituente della materia oscura non barionica sono le *WIMPs* (*si veda la finestra qui a fianco*). La loro esistenza è necessaria per spiegare la formazione delle strutture cosmiche, quali le galassie e i loro ammassi. Quindi è naturale supporre che la materia oscura presente negli aloni galattici e negli ammassi di galassie sia costituita prevalentemente da WIMPs, oltre che dai barioni oscuri. Si può dimostrare che in tale scenario Ω vale circa 0,3: le WIMPs sono più abbondanti dei barioni, ma non bastano per rendere l'universo euclideo.

Apparentemente la soluzione di questo dilemma sembra banale: sarebbe sufficiente immaginare che le WIMPs mancanti fossero diffuse nello spazio cosmico. In realtà - come talvolta accade - la natura è più fantasiosa di chi la studia, perché c'è ragione di ritenere che le WIMPs non esauriscano tutta la materia non barionica. Uno studio delle proprietà globali dell'universo, basato sull'osservazione di un campione di stelle estremamente lontane (perché siano visibili devono essere molto brillanti e sono state scelte le cosiddette supernove di tipo Ia), ha mostrato che l'universo attuale si sta espandendo in modo accelerato.

A prima vista, sembra di essere di fronte a un paradosso, perché sappiamo che nell'ambito del modello cosmologico standard l'espansione cosmica è necessariamente decelerata, a causa della mutua attrazione gravitazionale esercitata dalla materia in esso contenuta. Dobbiamo forse concludere che il modello cosmologico standard sia sbagliato?

La situazione è meno drammatica di quanto possa apparire. Si può «salvare» il modello - con i suoi straordinari successi - ipotizzando l'esistenza di un nuovo tipo di materia oscura diffusa nell'universo, a patto che possieda proprietà radicalmente diverse da quelle che attribuiamo alla materia ordinaria. Non sapendo bene di che cosa si tratti, è stata chiamata con il nome aristotelico di «quintessenza». Sia i comuni barioni sia le WIMPs sono caratterizzati da una pressione positiva: se sono posti all'interno di un palloncino, questo tende a espandersi sotto l'effetto della pressione corrispondente. Al fine di spiegare l'accelerazione dell'universo è invece necessario che la quintessenza si comporti in modo opposto: se racchiusa in un palloncino, questo tenderebbe a con-

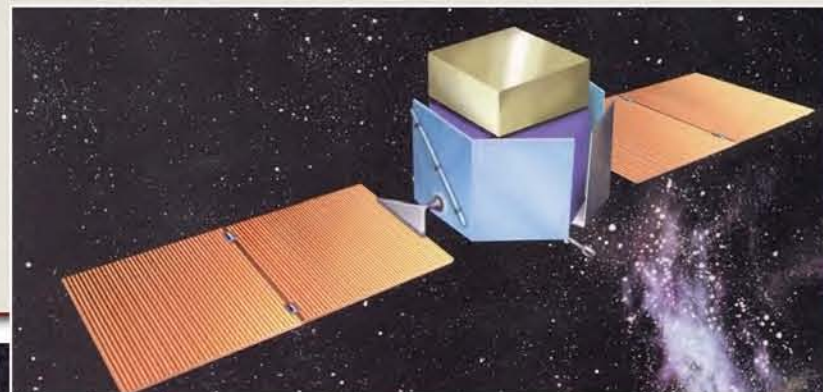
Il futuro dell'astronomia gamma è AGILE

AGILE è la prima delle piccole missioni scientifiche dell'Agenzia spaziale italiana, e sarà dedicata all'astronomia gamma, uno dei nuovi campi dell'astronomia moderna, nata e sviluppatasi nell'era spaziale poiché l'atmosfera è opaca ai fotoni gamma. Fotoni di energia così elevata devono essere rivelati uno per uno con una camera a scintille, uno strumento derivato dalla fisica delle particelle, capace di far materializzare il fotone e di misurarne energia e direzione d'arrivo.

Oggi l'astronomia gamma non dispone di nessuno strumento in orbita. Il Compton Observatory della NASA ha finito la sua missione e nulla del genere è previsto prima del 2006, quando andrà in orbita GLAST. Tra pochi mesi l'Agenzia spaziale europea (ESA) lancerà Integral, un osservatorio dedicato a coprire l'intervallo tra l'astronomia X e l'astronomia gamma. Ci aspettiamo grandi cose da Integral, ma molti quesiti resteranno senza risposta se non si potrà spingere lo studio anche alle energie più elevate, dove possiamo trovare la firma dell'interazione della materia con i raggi cosmici, dell'accelerazione delle particelle e dell'annichilazione delle WIMPs.

AGILE si propone di riaprire la finestra sull'universo dell'astronomia gamma di alta energia. Strumento innovativo e compatto, nato dalla collaborazione tra CNR e INFN, può fare più e meglio di quanti lo hanno preceduto. Il tracciatore di fotoni gamma sarà associato a due altri rivelatori: sotto, un piccolo calorimetro dedicato alla misura dell'energia dei raggi gamma; sopra (Super), il primo piano del silicio agirà in accoppiata con una maschera ad apertura codificata, formando un rivelatore indipendente sensibile ai raggi X. Super-AGILE allargherà il campo di azione della missione ai raggi X.

Un piccolo osservatorio al servizio della comunità astrofisica che ha l'ambizione di dare un contributo alla soluzione di alcuni problemi che EGRET ha lasciato aperti. È da AGILE (e poi da GLAST) che ci aspettiamo un valido aiuto nella comprensione della materia oscura. Da mappe gamma più dettagliate pensiamo di poter ricavare informazioni sugli ammassi oscuri dei quali abbiamo parlato nel testo.

D'altro lato anche le WIMPs dovrebbero lasciare una firma leggibile nei fotoni gamma di più alta energia. È lì che si concentreranno l'attenzione e le speranze dei cacciatori di astroparticelle.

Cortesia Agenzia spaziale italiana

Hubble Space Telescope Science Institute

L'AMMASSO GLOBULARE G1, costituito da circa 300.000 stelle al termine della loro vita, si presenta come una grande sfera. In alto, un'immagine artistica di AGILE, il satellite dell'ASI per l'astronomia a raggi X e gamma.

trarsi. In altri termini, la quintessenza deve avere una pressione negativa. Di fatto, si può dimostrare che tale pressione dà luogo a una «gravità repulsiva», che quindi accelera l'espansione cosmica. Lo studio delle supernove la dà anche un risultato quantitativo: il contributo della quintessenza a Ω è di circa 0,65. Adesso il valore di Ω, dato dalla somma dei contributi dovuti ai barioni, alle WIMPs e alla quintessenza, è 0,05 + 0,3 + 0,65, cioè proprio 1, in accordo con il risultato della missione Boomerang. Sfortunatamente sulla natura della quintessenza non sappiamo altro.

Barioni oscuri e raggi gamma

Occupiamoci infine della natura della materia oscura barionica, che - per quanto meno esotica delle WIMPs e della quintessenza - non è meno interessante ed elusiva. Benché siano state avanzate varie ipotesi riguardo alla sua composizione, la più naturale è che si tratti di stelle o nubi di gas presenti negli aloni galattici, che non riusciamo a «vedere» perché la radiazione emessa è troppo debole.

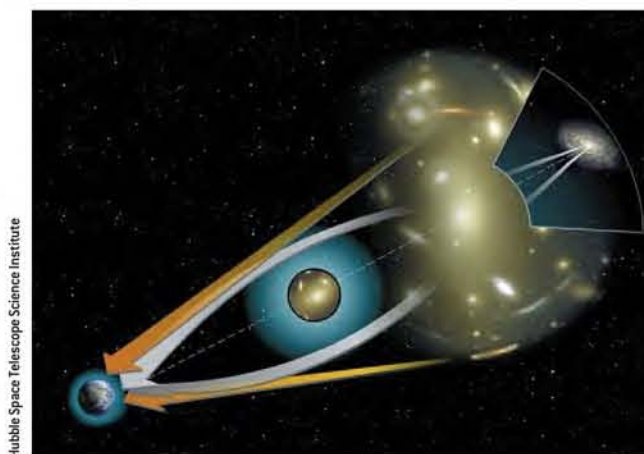
Una classe di candidati comprende le stelle ordinarie alla fine della loro fase evolutiva, quali nane bianche, stelle di neutroni e buchi neri. Studi recenti hanno però escluso tale possibilità: se così fosse, gli aloni galattici conterrebbero una quantità eccessiva di «metalli» (elementi più pesanti dell'elio), prodotti durante l'evoluzione stellare. Il problema non si presenta se si suppone che la materia oscura barionica sia formata da «nane brune»: corpi celesti con massa di poco inferiore a un decimo della massa solare, troppo piccoli perché si inneschino le reazioni termonucleari che rendono luminose le stelle ordinarie. Quindi non c'è modo di osservare le nane brune. Il loro meccanismo di formazione implica che siano raggruppate in ammassi oscuri contenenti anche gas freddo - in prevalenza idrogeno molecolare - sotto forma di nubi. È notevole che la teoria standard che spiega la formazione degli ammassi globulari (agglomerati sferoidali di centinaia di migliaia di stelle) predica anche l'esistenza di tali ammassi oscuri nella regione più esterna degli aloni galattici, proprio dove sappiamo che deve trovarsi la materia oscura.

Come fare a individuarne la presenza? Nella prima metà degli anni novanta, la scoperta dell'effetto di microlente gravitazionale sembrava offrire lo strumento ideale per scoprire le nane brune presenti nell'alone oscuro della Via Lattea. Anche qui alla base del fenomeno c'è la deflessione della luce che si produce quando una nana bruna incrocia la linea di vista di una stella puntiforme dello sfondo. Solo che – a differenza di quanto avviene per le galassie – le immagini multiple sono troppo vicine per venire osservate singolarmente, ma la loro sovrapposizione provoca un'amplificazione della luminosità della stella in esame. Benché eventi di microlente siano stati effettivamente osservati, la loro interpretazione si è rivelata più complessa del previsto. Sicuramente le nane brune non esauriscono la materia oscura dell'alone, che presumibilmente contiene anche nubi di gas barionico freddo.

I miraggi gravitazionali potrebbero non essere l'unica arma a disposizione dei cacciatori di materia oscura barionica. Infatti le nubi di gas freddo sfuggono facilmente ai radioastronomi, ma non possono evitare che i protoni di alta energia - presenti nei raggi cosmici - producano raggi gamma nell'urto con i protoni dei loro nuclei. Se queste nubi fossero responsabili di una frazione non trascurabile alla materia oscura presente nell'alone galattico, l'intensità della loro emissione gamma dovrebbe essere rivelabile con gli strumenti attuali. A questo proposito è importante sottolineare che la limitata risoluzione angolare dei rivelatori gamma non permette di distinguere l'emissione proveniente da nubi raggruppate in ammassi oscuri da un fondo diffuso. D'altra parte, un'analisi statistica sofisticata può permettere di determinare se un flusso gamma provenga dall'alone galattico o se sia invece di origine extragalattica. Nel 1998 tale analisi è stata effettuata sull'emissione gamma osservata dal rivelatore EGRET a bordo del satellite CGRO lanciato dalla NASA. Il risultato sembra indicare che si tratta effettivamente di un'emissione dovuta all'alone galattico, ma in casi come questi la prudenza è d'obbligo.

Saranno le prossime missioni di astronomia gamma a dirci quanto questi ragionamenti siano corretti. Prima volerà la missione italiana AGILE (*si veda la finestra nella pagina a fronte*), poi GLAST, uno strumento molto più ambizioso, nel quale l'Italia ha un ruolo importante. Studiando i loro dati, è auspicabile che la materia che non vediamo diventi un po' meno oscura.

Hubble Space Telescope Science Institute

UNA SPETTACOLARE LENTE GRAVITAZIONALE osservata da Hubble nell'ammasso di galassie Abell 2218. La deformazione e la moltiplicazione degli oggetti che si trovano oltre l'ammasso è prodotta dalla distorsione della luce dovuta al campo gravitazionale dell'ammasso stesso. Tramite questo fenomeno si possono individuare oggetti opachi (ovvero «oscuri») grazie alla distorsione che producono sulla luce di oggetti più lontani.

Hubble Space Telescope Science Institute

BIBLIOGRAFIA

JUNGMAN G., KAMIONKOWSKI M. e GRIEST K., *Supersymmetric Dark Matter*, in «Physics Reports», 267, p. 195, 1996.

DE PAOLIS F., INGROSSO G., JETZER PH. e RONCADELLI M., *Gamma Ray Astronomy and Baryonic Dark Matter*, in «Astrophysical Journal», 510, p. L103, 1999.

DE BERNARDIS P. e altri, *A Flat Universe from High-Resolution Maps of the Cosmic Microwave Background Radiation*, in «Nature», 404, p. 955, 2000.

BERGIA S., *Dialogo sul sistema dell'universo*, McGraw-Hill, Milano, 2002.

RONCADELLI M., *Aspetti astrofisici della materia oscura* (di prossima pubblicazione presso Bibliopolis, Napoli, 2002).

Per la missione Agile si veda http://www.ifctr.mi.cnr.it/Agile

La SCHIAVITÙ del XXI secolo

Al contrario di quanto comunemente si pensa, la schiavitù non è scomparsa. I sociologi cercano di spiegare perché esista ancora

di Kevin Bales

MARIA RODRIGUES FERREIRA ROCHA, madre di Jefferson (*in braccio*) e di Marta, lavora in una carbonaia del Grao Mogol, in Brasile. Dice di essere in schiavitù dall'età di cinque anni.

Per Meera, la rivoluzione iniziò con una rupia. Quando un operatore sociale giunse allo sperduto villaggio di Meera, non segnato su alcuna carta, scoprì che l'intera popolazione era vincolata da un debito ereditario. Forse tutto era iniziato al tempo dei loro nonni o dei loro bisnonni - pochi erano in grado di ricordarlo - fatto sta che a un certo momento del loro passato le famiglie avevano iniziato a lavorare gratuitamente per rifondere un prestito in denaro. Il debito era passato di generazione in generazione. Bambini di cinque anni lavoravano nelle cave spaccando sassi con il martello per ricavare sabbia. Polvere, schegge volanti di roccia e grossi pesi avevano lasciato molti abitanti del villaggio con silicosi, occhi feriti e schiene spezzate. Dopo aver riunito alcune donne, l'operatore sociale propose un piano radicale. Se gruppi di dieci donne avessero messo da parte un'unica rupia alla settimana dalle esigue somme che i creditori davano loro per comprare il riso, egli avrebbe fornito un capitale iniziale e tenuto al sicuro i fondi. Meera e altre nove donne formarono il primo gruppo.

Lentamente, le rupie crebbero. Dopo tre mesi, il gruppo aveva risparmiato abbastanza per restituire il prestito a cui era vincolata Meera, la quale iniziò a guadagnare per il suo lavoro e poté aumentare di molto il suo contributo al gruppo. In altri due mesi, una seconda donna divenne libera, e il mese dopo un'altra ancora.

A quel punto le altre donne, vedendo che la libertà era possibile, non fecero altro che disconoscere il proprio debito e dichiararsi libere. I creditori si mossero rapidamente contro di loro, minacciandole e allontanandole dal posto di lavoro, ma le donne trovarono occupazione in altre cave. Nuovi gruppi seguirono il loro esempio. Io sono stato due volte in quel villaggio. Alla mia seconda visita tutti gli abitanti erano liberi e tutti i bambini frequentavano la scuola.

A meno di 100 chilometri da quella zona, la terra diventa piana e fertile. Ma anche lì è diffusa la schiavitù per debiti. Quando lo conobbi nel 1997, Baldev stava arando. Il suo padrone lo chiamava «il mio *halvaha*», che significa «il mio contadino servo». Due anni dopo incontrai di nuovo Baldev e appresi che un'inattesa eredità da un parente gli aveva consentito di liberarsi dal debito. Ma non aveva liberato se stesso dalla schiavitù. Queste furono le sue parole:

«Dopo che mia moglie ha avuto questo denaro, abbiamo pagato il nostro debito, ed eravamo liberi di fare quello che volevamo. Ma io ero sempre preoccupato. Cosa sarebbe successo se un nostro figlio si fosse ammalato? E se il Governo avesse preteso dei soldi? Non appartenendo più a un padrone, non ricevevamo più cibo tutti i giorni come prima. Alla fine, sono andato dal padrone e gli ho chiesto di riprendermi. Non avevo soldi da chiedergli in prestito, ma mi ha accettato di nuovo come suo *halvaha*. Ora non sono più così preoccupato; so che cosa fare».

Non essendo preparato alla libertà, Baldev era ricaduto nella schiavitù. Senza un sostegno finanziario ed emotivo, la sua casuale emancipazione era durata poco. Anche se non dovrà trasmettere alcun debito ai figli, la sua famiglia sta visibilmente peggio di quelle che nella stessa zona sono libere.

Molti trovano sorprendente che nel XXI secolo esistano ancora la schiavitù per debiti e altre forme di servitù. In fondo, tutti i paesi hanno reso illegale possedere un essere umano ed esercitare un controllo totale su di esso. Eppure, ci sono persone come Baldev che rimangono schiave: forse 27 milioni in tutto il mondo, secondo una mia stima basata su numerosi rapporti di organizzazioni governative e non governative. Se gli schiavisti non possiedono più schiavi in senso legale, in che modo riescono a esercitare un controllo tale che, in certi casi, sono gli stessi schiavi liberati a ripristinare il vincolo servile? Questo è solo uno dei rompicapo che fanno della schiavitù la maggiore sfida per le scienze sociali dei nostri giorni.

Benché sia una delle forme di relazione umana più antiche e persistenti, individuabile nella maggior parte delle società in qualche stadio della loro storia, ancora poco si sa della schiavitù. Gli storici hanno prodotto una corposa letteratura sulla schiavitù in America prima della guerra di secessione, ma quasi nulla è stato scritto su altri tipi di schiavitù. È come se tutte le nostre conoscenze sugli aracnidi si basassero sulle tracce lasciate da una singola specie di ragno estinto. In questo attuale stato di ignoranza, abbiamo poche speranze di sradicare la schiavitù. Di garantire che Meera, e non Baldev, diventi il modello.

Craig Chivers/AP Photo (pagine precedenti); Alexander Nemenov/AFP Photo

IN SINTESI

- Secondo stime basate su rapporti di organizzazioni governative e non governative il numero di persone in stato di schiavitù potrebbe aggirarsi sui 27 milioni in tutto il mondo.
- Molti schiavi sanno che la loro schiavitù è illegale, ma la forza, la violenza e la coercizione psicologica li portano ad accettarla: talora, liberati, sono essi stessi a tornare al vincolo servile.
- Per vincere la sfida della schiavitù bisogna combattere la diffusa corruzione di governi e polizie e varare iniziative che modifichino il contesto culturale in cui vivono schiavi e schiavisti.

La nuova schiavitù

I sociologi sanno benissimo che la schiavitù si sta evolvendo e sta aumentando in termini assoluti. Come i ragni, si trova in tutto il mondo, in genere nascosta negli spazi oscuri dell'economia. Negli ultimi anni, giornalisti e attivisti hanno documentato numerosi esempi. Il traffico di esseri umani - il contrabbando di persone tra diversi paesi, spesso in mano al crimine organizzato - è divenuto un problema enorme, soprattutto in Europa e nel Sud-Est asiatico. Molte persone, attratte dalle opportunità economiche, pagano i trafficanti per attraversare le frontiere, ma poi si ritrovano vendute a sfruttatori che le obbligano, per pagare il costo del passaggio, a prestare servizi domestici o a lavorare in manifatture illegali oppure in bordelli. Altre sono rapite e contrabbandate contro la loro volontà. In certe zone, specie in Brasile e in Africa occidentale, i lavoratori vengono spinti con promesse a firmare un contratto e poi trasferiti in lontane piantagioni da cui non possono più allontanarsi. In alcune aree dell'Asia meridionale e dell'Africa settentrionale, la schiavitù ha una tradizione millenaria che non è mai stata realmente sradicata.

Jean-Marc Bouju/AP Photo

MACEDONIA: Tanja, 24 anni, in un centro per rifugiati a Skopje. È sfuggita alla prostituzione dopo che i guerriglieri etnici albanesi hanno compiuto un'incursione nel bar in cui racconta di essere stata tenuta schiava. Aspetta di tornare nella nativa Moldavia.
SUDAN: Akuac Malong (*a sinistra*), 13 anni, si avvia verso il suo villaggio, Madhol, nel Sudan meridionale. Racconta di essere stata rapita e tenuta per sette anni come schiava domestica nel Sudan settentrionale.

La condizione di questa gente ha attirato l'attenzione dei governi e di organizzazioni quali il Vaticano, le Nazioni Unite, l'International Organization for Migration e Amnesty International. Due anni fa, il Governo degli Stati Uniti ha aperto un ufficio di coordinamento per affrontare il traffico di esseri umani. Diversi ricercatori iniziano a condurre studi intensivi. L'approccio aneddotico e giornalistico sta lentamente lasciando il passo alla rigorosa indagine sociologica. Per esempio, Urs Peter Ruf dell'Università di Bielefeld in Germania ha documentato l'evoluzione delle relazioni padrone-schiavo nell'odierna Mauritania. Louise Brown dell'Università di Birmingham, nel Regno Unito, ha condotto uno studio sulle donne costrette a prostituirsi in Asia. David Kyle dell'Università della California a Davis e Rey Koslowski della Rutgers University hanno indagato sul traffico di esseri umani. Io ho proposto una teoria sulla schiavitù nel mondo e ho condotto studi per verificarla in cinque paesi.

Una domanda che viene comunemente posta è perché queste pratiche si debbano chiamare «schiavitù» e non semplicemente una forma particolarmente grave di sfruttamento. La risposta è semplice. Nel corso della storia, schiavitù ha significato perdita del libero arbitrio e della libera scelta con l'aggiunta di violenze, a volte esercitate dallo schiavista, a volte da membri dell'apparato statale. E proprio questo è ciò che io e altri ricercatori abbiamo osservato. Certo, già i lavoratori che si trovano ai gradini più bassi della scala socio-economica hanno ben poche opzioni, ma a un certo punto del *continuum* dello sfruttamento anche queste opzioni vengono meno. Questi lavoratori non sono in grado di andarsene.

La sofferenza umana si presenta sotto varie forme, ma la schiavitù ha un orrore suo proprio, evidente a chiunque l'abbia vista con i propri occhi. Anche quando non comporta percosse o vessazioni fisiche, porta a una degradazione psicologica che spesso rende le vittime incapaci di muoversi al di fuori di quel contesto. «Ho lavorato nelle prigioni e ho studiato casi di violenza domestica - conferma Sydney Lytton, uno psichiatra statunitense che ha aiutato degli schiavi liberati - ma questo è peggio.»

Anche se la schiavitù si manifesta in modo diverso a seconda dei luoghi, è compito degli studiosi di scienze sociali capirne le caratteristiche universali, in modo da rendere applicabili i rimedi eventualmente individuati per casi specifici. Il primo tra questi tratti comuni è la relazione economica di fondo. In Alabama, nel 1850, uno schiavo agricolo costava 1500 dollari (circa 30.000 dollari in valuta corrente). Oggi, un lavoratore equivalente lo si può avere per circa 100 dollari, un costo che può configurarsi come un «noleggio» o un «onorario» a un trafficante. Una giovane donna del Sud-Est asiatico o dell'Europa orientale potrebbe essere venduta diverse volte, passando attraverso una serie di intermediari e protettori, prima di finire in un bordello.

Non vale la pena di soffermarsi troppo su cifre specifiche, perché il guadagno dello schiavista varia da caso a caso. Ciò che conta è che il lavoro forzoso incide sulle spese di investimento in modo molto minore di una volta. Nell'America dell'Ottocento

IL MONDO DELLA SCHIAVITÙ

Chi conduce ricerche sulla schiavitù è il primo a sapere che le statistiche che utilizza sono ben poco affidabili. Per sua stessa natura, il fenomeno è già difficile da individuare; quantificarlo lo è ovviamente ancora di più. I ricercatori devono compiere estrapolazioni dai dati di incidenza noti - basati sui resoconti della polizia, degli operatori sociali, dei giornalisti più impegnati e degli schiavi liberati - per arrivare al quadro complessivo. In ogni campo di studio, dalla sociologia all'astrofisica, la procedura scientifica standard prevede che si facciano ipotesi. Purtroppo, le stime numeriche sono spesso riportate, e - quel che è peggio - citate da altre citazioni, senza fare cenno alla loro aleatorietà.

Per esempio, l'International Organization for Migration è recentemente risalita fino alla fonte di una delle statistiche più citate sul traffico di esseri umani, secondo la quale nel 1993 sono entrati in Europa occidentale da 250.000 a 350.000 clandestini. La statistica si basava sui 60.000 arresti effettuati ai confini e su una stima della polizia di quattro o cinque ingressi riusciti per ogni clandestino fermato. Un'altra cifra spesso riportata - da 45.000 a 50.000 donne e bambini introdotti clandestinamente ogni anno negli Stati Uniti dai trafficanti - viene da una conferenza riservata svoltasi nell'aprile 1999 presso gli uffici della CIA. L'origine di quel dato non è mai stata resa pubblica.

L'autore ha seguito due strade per affrontare l'incertezza dei dati. Innanzitutto ha raccolto varie stime sul numero degli schiavi nei singoli paesi (*tabella*), tenendo conto che alcune fonti, come quelle governative, potrebbero tendere a sottostimare il problema e che altre, come i gruppi impegnati per il rispetto dei diritti umani, tendono a sovrastimarlo. La tabella non tiene conto di quei paesi e regioni per i quali i ricercatori non dispongono di dati. In secondo luogo, ha preparato una scala del grado relativo del problema nei diversi paesi (*mappa colorata*), probabilmente più facile da giudicare rispetto al numero assoluto degli schiavi.

NOTA: le due rappresentazioni - la stima numerica del traffico di schiavi da e per un paese e la mappa della gravità del problema - vanno intese come completamente indipendenti, in quanto basate su indicatori socio-economici diversi. Esse sono inoltre relative a due differenti aspetti: l'uno specifico del transito di schiavi e l'altro della presenza di schiavi sul territorio.

George Musser, redazione di «Scientific American»

PAESE O REGIONE	TRAFFICO IN INGRESSO	TRAFFICO IN USCITA	STIMA DEL NUMERO DI SCHIAVI
Afghanistan	◆◆	●●●	20.000–50.000
Albania	◆	●●●	5000–10.000
Algeria	◆◆	●●	1000–2000
Arabia Saudita	◆◆◆◆	●●●●	2000–5000
Argentina	◆◆	●●	1000–1000
Armenia	◆	●●	2000–4000
Australia	◆◆◆	●	4000–6000
Austria	◆◆		1000–2000
Azerbaigian	◆	●●	1000–2000
Bahrain	◆◆	●●	1000–2000
Bangladesh	◆	●●●●	10.000–10.000
Barbados	◆	●	0–100
Belgio	◆◆	●	5000–7000
Benin	◆◆◆◆	●●●●	20.000–40.000
Bielorussia	◆	●●●	2000–3000
Bosnia-Erzegovina	◆◆	●●	3000–4000
Brasile	◆◆◆◆	●●●●	300.000–500.000
Bulgaria	◆◆	●●●●	2000–4000
Burkina Faso	◆◆◆	●●●	2000–4.000
Cambogia	◆◆	●●●	3000–6000
Camerun	◆◆◆	●●●	6000–12.000
Canada	◆◆	●	10.000–20.000
Cina	◆◆◆	●●●	250.000–500.000
Colombia	◆◆	●●●	5000–10.000
Congo (Rep. Dem.)	◆◆◆	●●●	1000–1500
Corea del Sud	◆◆	●●	10.000–15.000
Costa d'Avorio	◆◆◆◆	●●●●	30.000–80.000
Costa Rica	◆	●●	0–100
Croazia	◆◆	●●●	1000–2000
Danimarca	◆	●	1000–2000
Dominica	◆	●	0–100
Egitto	◆◆	●●	1000–2000
Emirati Arabi Uniti	◆◆◆◆	●●	1000–2000
Estonia	◆◆	●●	1000–2000
Filippine	◆◆	●●●●	3000–10.000
Francia	◆◆◆	●	10.000–20.000
Gabon	◆◆	●●●	5000–10.000
Gambia	◆◆◆◆	●●●●	3000–6000
Georgia	◆◆	●●●●	1000–2000
Germania	◆◆◆	●	5000–9000
Ghana	◆◆◆	●●●	10.000–20.000
Giamaica	◆◆	●●	0–500
Giappone	◆◆◆◆	●●	5000–10.000
Grecia	◆◆	●	5000–9000
Guinea-Bissau	◆◆	●●●	1000–2000
Guinea Eq.	◆◆◆	●●●●	1000–2000
Haiti	◆◆	●●●●	75.000–150.000
Hong Kong	◆◆◆	●●	1000–2000
India	◆◆◆	●●●●	18.000.000–22.000.000
Indonesia	◆◆	●●●	4000–8000
Israele	◆◆◆◆	●	4000–6000
Italia	◆◆◆◆	●●	30.000–40.000
Kazakistan	◆	●●	1000–2000
Kenya	◆	●●	3000–5000
Kirghizistan	◆	●	1000–1500
Kuwait	◆◆	●	1000–2000
Laos	◆	●●●	5000–10.000
Libano	◆◆	●●	1000–1500
Liberia	◆◆	●●	3000–6000
Lussemburgo	◆◆	●	2000–3000
Macedonia	◆◆	●●●	1000–1500
Malaysia	◆◆◆	●●●	3000–6000
Mali	◆◆◆◆	●●●●	10.000–20.000
Marocco	◆◆◆◆	●●●●	1000–2000
Mauritania	◆◆	●●●	250.000–300.000
Messico	◆◆◆	●●●	3000–6000
Moldavia	◆◆◆	●●●	1000–1500
Myanmar	◆	●●●●	50.000–100.000
Nepal	◆◆	●●●●	250.000–300.000
Niger	◆◆◆◆	●●●●	3000–5000
Nigeria	◆◆	●●●●	20.000–40.000
Oman	◆◆◆	●●	1000–2000
Paesi Bassi	◆◆◆	●	3000–5000
Pakistan	◆◆◆	●●●●	2.500.000–3.500.000
Panama	◆	●	0–100
Perù	◆◆	●●	3000–5000
Polonia	◆◆◆◆	●●●●	2000–4000
Portogallo	◆◆◆	●●	5000–6000
Puerto Rico	◆	●	0–100
Qatar	◆◆◆	●●	1000–2000
Regno Unito	◆	●	4000–5000
Rep. Ceca	◆◆◆◆	●●●●	2000–5000
Rep. Dominicana	◆	●●	5000–6000
Rep. Sudafricana	◆◆◆	●●●	5000–6000
Romania	◆◆◆	●●●●	5000–6000
Russia	◆◆◆◆	●●●●	8000–10.000
São Tomé	◆◆◆◆	●●●●	1000–2000
Senegal	◆◆◆◆	●●●●	6000–12.000
Sierra Leone	◆◆◆◆	●●●●	3000–6000
Singapore	◆◆◆	●●●	1000–1500
Slovacchia	◆◆◆	●●●	2000–3000
Spagna	◆◆	●●	10.000–15.000
Sri Lanka	◆◆	●●●●	5000–10.000
Sudan	◆◆◆◆	●●●●	20.000–50.000
Stati Uniti	◆	●	100.000–150.000
Svezia	◆		2000–3000
Svizzera	◆	●	1000–1500
Tagikistan	◆◆	●●	2000–4000
Tanzania	◆◆	●●	2000–4000
Thailandia	◆◆◆◆	●●●●	30.000–60.000
Togo	◆◆	●●●	6000–8000
Trinidad	◆	●	0–100
Turchia	◆◆◆◆	●●●●	20.000–30.000
Turkmenistan	◆◆◆	●●●	1000–2000
Ucraina	◆◆	●●●●	3000–5000
Uganda	◆◆	●●●	5000–8000
Ungheria	◆◆◆	●●●	1000–2000
Uzbekistan	◆◆	●●	1000–2000
Vietnam	◆◆	●●●	5000–7000
Yemen	◆◆◆	●●	1000–2000
Yugoslavia	◆◆◆	●●●●	8000–10.000

uno schiavo doveva lavorare vent'anni per rifondere il suo prezzo e i costi di mantenimento; oggi, un lavoratore forzoso dell'Asia meridionale può farlo in due anni. Il crollo dei prezzi ha modificato non solo la redditività della schiavitù ma anche le relazioni tra schiavo e padrone. Il costoso schiavo del passato era un investimento da salvaguardare; lo schiavo di oggi è un fattore economico adatto a una produzione di basso livello. Lo schiavista non ha interesse a dare assistenza sanitaria o a prendersi cura di schiavi che abbiano superato la loro età migliore.

Ci sono diverse spiegazioni per questo nuovo scenario. La popolazione mondiale è triplicata dopo la seconda guerra mondiale e si è creata una massa enorme di potenziali schiavi. Inoltre, le trasformazioni economiche nel mondo in via di sviluppo hanno prodotto sì effetti benefici, ma anche la scomparsa delle reti di assistenza comunitarie e sociali, e la nascita di gigantesche bidonville. Ma la vulnerabilità di grandi masse di persone non è sufficiente a produrre schiavi: ci vuole anche la violenza. Il fattore chiave della persistenza della schiavitù è la scarsa osservanza della legalità in molte zone del mondo. La diffusa corruzione di governi e polizie consente un esercizio impunito della violenza anche là dove la schiavitù è ufficialmente illegale.

Nel corso della storia, schiavitù ha significato perdita del libero arbitrio e della libera scelta, con l'aggiunta di violenze, esercitate dallo schiavista o da membri dell'apparato statale

Jean-Marc Bouju/AP Photo

Liberare la mente

Un secondo tratto comune tra le differenti forme di schiavitù è la manipolazione psicologica. La concezione popolare vede lo schiavo come qualcuno in catene pronto a fuggire se appena ne avesse la minima opportunità o come uno che semplicemente non conosce alternative migliori. Ma le storie di Meera e di Baldev, come tante altre, mostrano l'ingenuità di questa visione. Stando alla mia esperienza, gli schiavi spesso sanno benissimo che la loro schiavitù è illegale. La forza, la violenza e la coercizione psicologica li hanno spinti ad accettarla. Quando gli schiavi iniziano ad accettare il loro ruolo e a identificarsi con il loro padrone, non è più necessario un costante vincolo fisico. Arrivano a percepire la propria situazione non come il frutto di un'azione deliberata volta a colpirli individualmente, ma come parte di uno stato di cose normale, per quanto deprecabile.

Una storia tipica è quella di Siri, una giovane che ho conosciuto nel nord-est della Thailandia. Una donna aveva avvicinato i suoi genitori, offrendo loro di trovare un lavoro alla figlia quattordicenne e anticipando 50.000 baht (corrispondenti a circa 1300 euro) sui futuri guadagni. L'intermediaria «passò» Siri a un bordello di infimo ordine per il doppio della cifra. Quando la ragazza tentò di scappare, il suo debito venne raddoppiato. Le fu detto che doveva rifonderlo, insieme a un affitto mensile di 30.000 baht, con i suoi guadagni di 100 baht per cliente.

Siri non aveva la minima idea di cosa volesse dire fare la prostituta. La sua iniziazione avvenne sotto forma di aggressione e di stupro. Sconvolta, la ragazza dovette trovare il modo per sopravvivere. Nel mondo in cui viveva, esistevano solo persone con tutto il potere e persone senza alcun potere. Premi e punizioni venivano da un'unica fonte, il protettore. Spesso le giovani donne nella posizione di Siri trovano conveniente, per sopravvivere, stabilire una relazione con il protettore. Pur essendo delinquenti, i protettori non ricorrono unicamente alla violenza, ma preferiscono indurre insicurezza e dipendenza.

Michael St. Maur Sheil/Black Star

BENIN: Constant Ayitcheou, 13 anni, afferma di essere stato venduto all'età di otto anni da un amico del padre. Dopo che gli erano stati promessi istruzione e denaro, si trovò invece in Nigeria a fare il servitore. La scritta «Pafajesd» sul foglio che tiene in mano è l'acronimo francese dell'organizzazione umanitaria che ha contribuito alla sua liberazione.
SUDAN: Alcuni dei ragazzi che aspettano di essere rilasciati nella cittadina di Madhol, a sud-ovest di Khartum, il 13 dicembre 1997. Un mercante arabo ha ceduto 132 schiavi - donne e bambini - a un rappresentante della associazione Christian Solidarity International, con sede in Svizzera, contro un riscatto di 13.200 dollari.

Le norme culturali hanno preparato queste giovani donne al controllo e alla sottomissione. Una ragazza si sente dire che i suoi genitori soffrirebbero se lei non cooperasse e non lavorasse duramente, che il debito è sulle sue spalle e deve rifonderlo. I ruoli sessuali in Thailandia sono chiaramente definiti, e dalle donne ci si aspetta che siano riservate, modeste e obbedienti, come si sentono continuamente ripetere. I protettori ricorrono anche alla religione. Le giovani donne sono spinte a credere di aver commesso terribili peccati in una vita passata e che quindi meritano la schiavitù e gli abusi. Devono accettare questo debito karmico per estinguerlo e riconciliarsi con il proprio destino.

Per sopportare la condizione di schiave, le giovani donne spesso parlano della loro dipendenza come di un compito o di un lavoro o di una forma di penitenza. Per accettare il loro ruolo e quello del protettore, devono evitare di considerarsi vittime ingannate. Devono iniziare a vedere la propria schiavitù dal punto di vista del padrone. Al tempo della mia visita, le donne del bordello di Siri si trovavano a diversi stadi di questo processo di sottomissione. Ad alcune era addirittura consentito far visita alle famiglie durante le feste, tanto tornavano sempre.

Troviamo lo stesso tipo di psicologia in un'altra forma di schiavitù, quella dei domestici portati in Europa e nel Nord America da diplomatici o uomini d'affari africani e asiatici. Cristina Talens, del Comitato contro la schiavitù moderna, ha lavorato per anni alla liberazione e alla riabilitazione di schiavi domestici che erano stati portati a Parigi. A suo giudizio, liberare il corpo era molto più facile che liberare la mente:

«Nonostante la violenza e le condizioni di vita e di lavoro, le persone in schiavitù hanno una loro integrità mentale e loro meccanismi per la sopravvivenza. Alcune possono apprezzare davvero alcuni aspetti della loro vita, magari la sicurezza che viene dal capire esattamente come vanno le cose. Quando si turba questo ordine, improvvisamente tutto diventa confuso. Alcune donne liberate hanno tentato il suicidio. Sarebbe facile pensare che ciò sia avvenuto per gli abusi attraverso i quali erano passate. Ma per alcune di queste donne la schiavitù aveva costituito il principale punto fermo della loro vita. Quando questo riferimento veniva meno, il senso della loro vita era come carta straccia. Veniva detto loro: "No, così non va. Comincia tutto daccapo". Era come se la loro vita non avesse alcun senso».

Giustificazioni pretestuose

La psicologia dello schiavo è come riflessa in quella dello schiavista. La schiavitù non si riduce semplicemente a una persona che vincola un'altra persona con la forza; è un'insidiosa mutua dipendenza difficile da rompere per lo schiavista non meno che per lo schiavo. Individuare nello schiavista il male allo stato puro può forse confortarci, ma è difficile rimanere del-

L'AUTORE

KEVIN BALES è docente di sociologia presso l'Istituto di Roehampton dell'Università di Surrey, a Londra. Membro del consiglio direttivo dell'organizzazione non governativa Anti-Slavery International, è consulente dello United Nations Global Program on Trafficking of Human Beings, della Economic Community of West African States, e dei Governi degli Stati Uniti, del Regno Unito, della Repubblica d'Irlanda, della Norvegia e del Nepal. Bales ha iniziato a studiare il fenomeno della schiavitù nei primi anni novanta. Uno dei volumi frutto delle sue ricerche, *I nuovi schiavi* (Feltrinelli, 2000), è stato candidato al Premio Pulitzer nel 2000 e ha vinto, nello stesso anno, la sezione dedicata alla saggistica internazionale del Premio Viareggio. Un documentario televisivo dedicato a lui e al suo lavoro ha vinto il Peabody Award , sempre nel 2000.

la stessa opinione quando si conoscono veri padroni di schiavi.

Quasi tutti gli schiavisti che ho incontrato e intervistato in Pakistan, India, Brasile e Mauritania erano persone affezionate alla famiglia, che si consideravano semplicemente uomini d'affari. Pilastri della comunità locale, guadagnavano bene, erano ben integrati dal punto di vista sociale e in buoni rapporti con il mondo della giustizia e della politica. La loro attività schiavistica non era vista come una pecca sociale, tranne forse da «estranei» che, a loro giudizio, non riuscivano a capire gli usi locali in materia di affari e di lavoro.

Come è possibile che uomini così positivi si comportino in modo così negativo? Un funzionario statale del distretto di Baldev, proprietario di diversi lavoratori schiavi, non aveva reticenze a proposito della sua attività: «È ovvio che ho lavoratori non liberi: sono un proprietario terriero. Io mantengo loro e le loro famiglie, e loro lavorano per me. Quando non sono nei campi, sono impegnati nei lavori domestici: lavano i vestiti, cucinano, puliscono, fanno riparazioni. Tutto, insomma. In fondo, sono di casta *kohl*; questo è quello che fanno: lavorano per *vaisya* come me. Io dò loro cibo e un po' di terra da lavorare. Hanno anche avuto in prestito dei soldi, quindi devo assicurarmi che rimangano sulla mia terra finché non li restituiscono. Lavoreranno nella mia fattoria finché non avranno ripagato tutto. Non mi importa se diventano vecchi: non si può mica buttare via il denaro!».

E commentava: «Dopo tutto, non c'è nulla di male nel lavoro forzoso. Hanno dei vantaggi dal sistema, e io pure. Anche se l'agricoltura è completamente meccanizzata, io continuo a tenere i miei lavoratori servi. Vede come faccio; io sono come un padre per questi lavoratori. È una relazione tra padre e figlio. Io li proteggo e li guido. Naturalmente, qualche volta devo anche castigarli, proprio come farebbe un padre».

Anche altri schiavisti mi hanno detto che i loro schiavi sono come i loro figli, che hanno bisogno di uno stretto controllo e di cure. E tirano in ballo la tradizione: dato che la pratica esiste da così tanto tempo, vuol dire che questo è l'ordine naturale delle cose. Per altri, è solo una questione di priorità: dicono che ridurre la gente in schiavitù è spiacevole ma che da questo dipende il benessere della loro famiglia. Spesso gli schiavisti interpongono numerosi dipendenti, su vari livelli, tra sé e gli schiavi. Negano volutamente a se stessi la conoscenza di ciò che fanno e quindi non se ne assumono la responsabilità.

Quaranta acri e un mulo

Tutto questo indica la necessità di un sistema di riabilitazione molto raffinato per gli schiavi liberati e anche per gli schiavisti. La libertà fisica non è sufficiente. Quando, nel 1865, gli Stati Uniti proclamarono l'emancipazione degli schiavi, il Governo non attuò alcun tipo di riabilitazione. La promessa del generale William Tecumseh Sherman di dare a ciascuno schiavo liberato «quaranta acri e un mulo» non venne mai mantenuta. Il risultato furono 4 milioni di persone buttate senza risorse e con scarsa protezione legale in un'economia disastrata. Si può affermare che l'America stia ancora soffrendo per questa liberazione senza riabilitazione.

Vivek Pandit, impegnato a sostenere i diritti umani con l'organizzazione indiana Vidhayak Sansad, ha passato più di 20 anni a liberare lavoratori forzosi. Con sicurezza afferma che la vera liberazione avviene nella mente; quella fisica non è sufficiente, come mostra il caso di Baldev. Per contro, la libertà mentale può portare con sé la libertà fisica, com'è avvenuto per Meera.

L'organizzazione di Pandit ha ideato un programma di istruzione che prepara ex schiavi a una vita di libertà. Vengono impartiti rudimenti di scienze per stimolare la loro curiosità e l'attenzione ai particolari; si fanno giochi di ruolo per favorire la capacità di risolvere problemi; si praticano giochi per sviluppare il pensiero strategico e la capacità di lavorare in gruppo. Questo addestramento è preceduto da una penosa ma stimolante discussione pubblica in cui il lavoratore racconta la propria esperienza di schiavitù e pronuncia una formale rinuncia, che viene registrata e diffusa nel villaggio. «Quando l'ex schiavo ha apposto la sua impronta digitale su questo documento pubblico - dice Pandit - non può più tornare indietro.»

Attualmente si stanno studiando sul campo diversi modelli di liberazione e riabilitazione [*si veda* www.sciam.com/explorations/2002/031102gabon *per uno studio su un programma realizzato nel Gabon*]. Stando all'esperienza maturata, per arrivare a una libertà stabile e sostenibile è necessaria una combinazione di aiuto economico, sostegno psicologico e istruzione. Il lavoro, però, è ancora nelle sue fasi iniziali. Non è stata ancora condotta alcuna valutazione sistematica di questi programmi.

L'aspetto economico della schiavitù è un altro rompicapo. In che modo i presunti liberatori possono spezzare l'economia sommersa e individuare il percorso fino a noi delle merci prodotte da schiavi? Perché esiste un così vasto traffico di persone attraverso i continenti? Quante di queste persone sono veri e propri schiavi, e perché questi flussi sono chiaramente in crescita? Qual è l'impatto di questa forza lavoro sulle economie nazionali? Che legami esistono tra traffico di esseri umani e traffico di droga e di armi?

Lo studio della schiavitù può suscitare forti quesiti sociali e politici. I ricercatori si trovano ad affrontare numerosi dilemmi etici, ed è quanto mai difficile arrivare alla chiarezza e all'oggettività quando gli individui e i governi cercano di nascondere le proprie attività. L'unico dato positivo è la sempre maggiore consapevolezza dell'esistenza del problema. La piaga della schiavitù infantile ha prodotto un aumento significativo degli stanziamenti, e la nuova collaborazione tra organizzazioni antischiaviste e aziende che utilizzano merci prodotte da schiavi è un modello innovativo per l'abolizione della schiavitù. Ma se le nostre cifre sono esatte, solo una piccola frazione degli schiavi è raggiunta e liberata ogni anno. La nostra ignoranza del loro mondo nascosto è ancora enorme.

BIBLIOGRAFIA

The Small Hands of Slavery: Bonded Child Labor in India, Human Rights Watch, 1996. Disponibile sul sito hrw.org/reports/1996/India3.htm

CALDWELL GILLIAN, GALSTER STEVEN e STEINZOR NADIA, *Crime and Servitude: An Exposé of the Traffic in Women for Prostitution from the Newly Independent States*, Global Survival Network, novembre 1997. Disponibile sul sito www.globalsurvival.net/femaletrade/9711russia.html

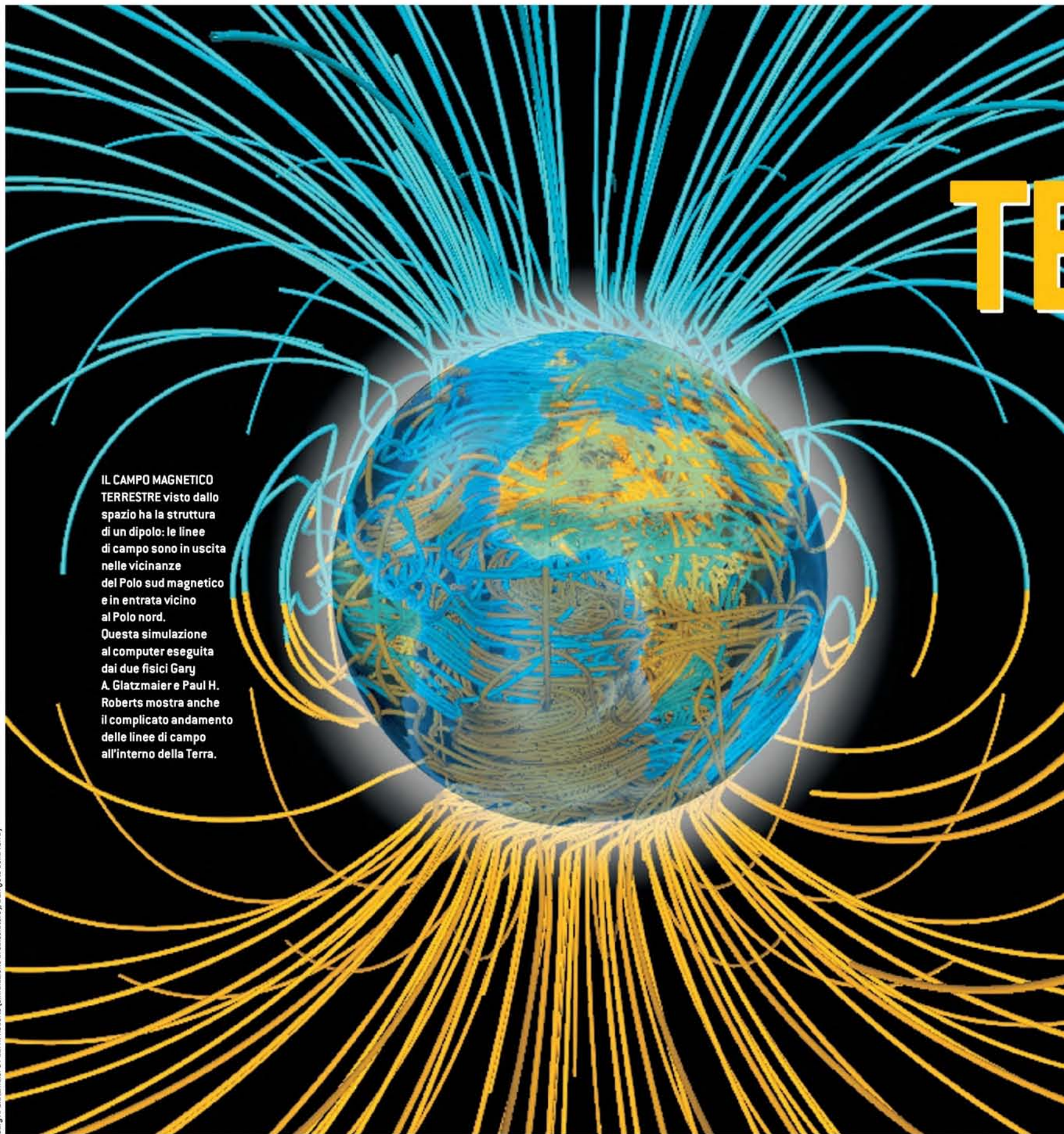
RICHARD O'NEILL AMY, *International Trafficking in Women to the United States: A Contemporary Manifestation of Slavery and Organized Crime*, Center for the Study of Intelligence, Central Intelligence Agency, novembre 1999. Disponibile sul sito usinfo.state.gov/topical/global/traffic/report/homepage.htm

BALES KEVIN, *I nuovi schiavi. La merce umana nell'economia globale*, Feltrinelli, Milano, 2000.

BROWN LOUISE, *Sex Slaves: The Trafficking of Women in Asia*, Virago, 2000.

RUF URS PETER, *Ending Slavery: Hierarchy, Dependency and Gender in Central Mauritania*, Transcript Verlag, 2001.

KYLE DAVID e KOSLOWSKI REY (a cura), *Global Human Smuggling: Comparative Perspectives*, Johns Hopkins University Press, 2001.

Siti di web di associazioni antischiaviste: www.freetheslaves.net, www.antislavery.org

IL CAMPO MAGNETICO TERRESTRE visto dallo spazio ha la struttura di un dipolo: le linee di campo sono in uscita nelle vicinanze del Polo sud magnetico e in entrata vicino al Polo nord. Questa simulazione al computer eseguita dai due fisici Gary A. Glatzmaier e Paul H. Roberts mostra anche il complicato andamento delle linee di campo all'interno della Terra.

Gary A. Glatzmaier e Paul H. Roberts (*simulazione al calcolatore*); DLR (*foto della Terra*)

La DINAMO TERRESTRE in laboratorio

Complessi esperimenti lo hanno dimostrato: fluidi conduttori in moto possono generare un campo magnetico permanente che simula il campo magnetico terrestre

di Ulrich Müller e Robert Stieglitz

Le proprietà delle rocce ferromagnetiche erano già note alle antiche culture cinese e messicana. E proprio i cinesi furono verosimilmente i primi a sfruttare l'allineamento Nord-Sud di un ago magnetico per la navigazione, seguiti nel Medioevo dai navigatori europei. Ma è solo nel 1600 che il medico e naturalista inglese William Gilbert (1544-1603), nel suo *De Magnete*, cercò di sistematizzare le conoscenze sul magnetismo e sul campo magnetico terrestre: dai suoi esperimenti e dalle misurazioni del campo terrestre eseguite da navi della flotta inglese dedusse che la Terra si comporta come un magnete permanente i cui poli si trovano nelle vicinanze dei poli geografici (Nord e Sud). Sulla superficie terrestre l'intensità del campo geomagnetico è circa un decimillesimo di quella di un magnete permanente comunemente in commercio. Grazie alle regolari osservazioni condotte negli ultimi 150 anni sappiamo che il campo magnetico terrestre varia nello spazio e nel tempo. Così, dal 1831 - anno in cui ne fu determinata l'esatta posizione da una spedizione polare britannica - il Polo nord magnetico si è spostato di diverse centinaia di chilometri verso nord-ovest. Anche l'intensità locale del campo magnetico alla superficie

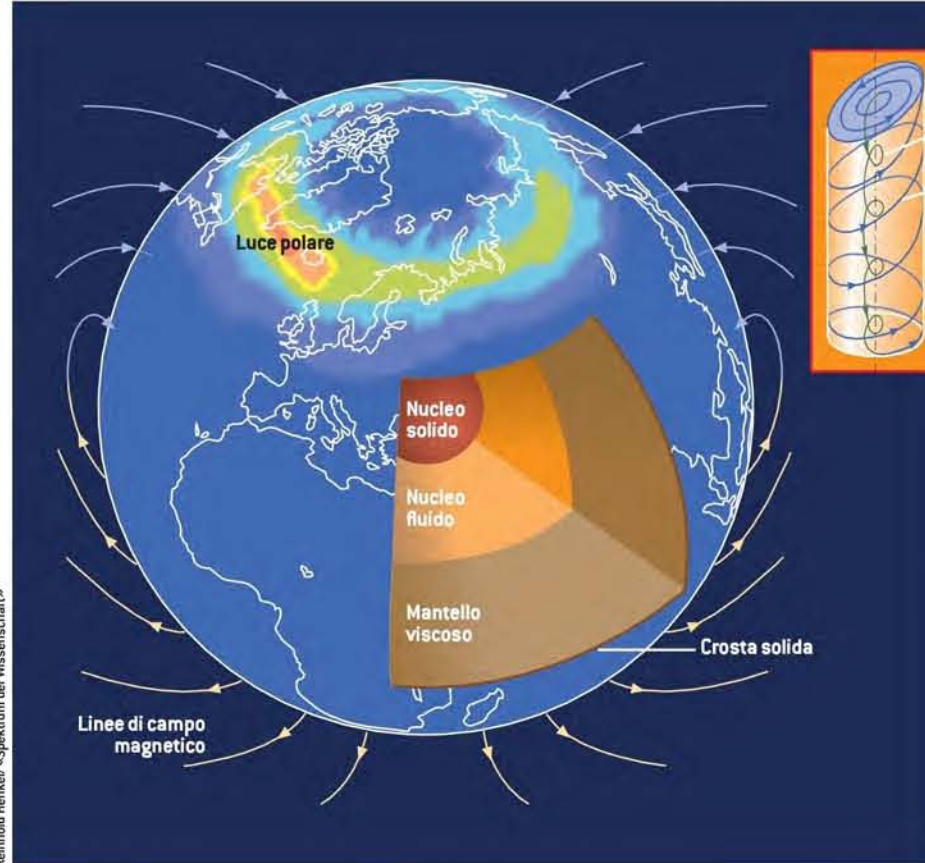
terrestre è sottoposta a fluttuazioni misurabili, che variano su una scala temporale molto ampia, da pochi secondi a milioni di anni. Oggi sappiamo che le fluttuazioni rapide sono provocate da fenomeni ionosferici, mentre le oscillazioni a lungo termine sono collegate a processi che si svolgono all'interno della Terra.

Nei cambiamenti a lungo termine, le cosiddette variazioni secolari, si riconoscono due tendenze: una è lo spostamento della configurazione del campo magnetico sulla superficie terrestre di circa 0,2 gradi verso occidente ogni anno, l'altra è una diminuzione annua dell'intensità di circa lo 0,07 per cento. Il perdurare di questo decremento farà sparire il campo magnetico entro 4000 anni. Dall'esame delle rocce contenenti minerali magnetizzati gli scienziati sono in grado di affermare che la Terra ha un campo magnetico da circa 3,5 miliardi di anni e che esso ha invertito la sua polarità diverse centinaia di volte. In media questa inversione di polarità si è verificata ogni 500.000 anni, ma in un tempo relativamente breve, nell'arco di poche migliaia di anni.

Ancora nel XIX secolo alcuni scienziati ritenevano che il campo magnetico terrestre avesse origine da un magnete permanente all'interno della Terra. Rilevamenti sismici e geofisici di vario tipo hanno però stabilito che le temperature all'interno della Terra sono molto più alte di quella massima compatibile (circa 800 gradi Celsius) con il ferromagnetismo. Dunque la causa del campo magnetico terrestre non può essere un magnete permanente di ferrite.

All'epoca della sua formazione, la Terra potrebbe aver in qualche modo «congelato» nella sua materia un campo magnetico esterno? La risposta potrebbe essere positiva, ma in base alle leggi dell'elettrodinamica questo tipo di campi lentamente si dissolve e per un corpo come la Terra ciò sarebbe avvenuto già dopo circa 10.000 anni. Poiché il campo magnetico terrestre ha almeno 3 miliardi di anni, ci si è chiesto quindi attraverso quali meccanismi esso si mantenga e che cosa ne produca i cambiamenti nello spazio e nel tempo.

Nel centro della Terra

Nel 1919 Joseph Larmor (1857-1942), fisico all'Università di Cambridge, fornì una prima indicazione per la soluzione dell'enigma. Egli suppose che i campi magnetici osservati sulla superficie solare fossero prodotti dal flusso di materia elettricamente conduttrice all'interno del corpo rotante della nostra stella. Ricondusse cioè il campo magnetico solare a un effetto dinamo. Il fisico statunitense Walter M. Elsasser e il geofisico inglese Edward C. Bullard, allora rispettivamente all'Università della California a San Diego e all'Università di Cambridge, hanno ripreso quest'idea cinquant'anni fa e l'hanno applicata alle condizioni terrestri.

Ovviamente, una dinamo all'interno della Terra non avrebbe potuto avere una struttura simile a quella di una dinamo di bicicletta o dei generatori di corrente. In questi manufatti una complicata disposizione di bobine e materiale ferritico, il rotore, gira rispetto a una configurazione simile ma statica, lo statore, inducendovi una corrente. All'interno della Terra abbiamo a che fare con una massa di metallo fuso che scorre con relativa facilità e che è un buon conduttore elettrico. Sottoposto alle forze generate dalla rotazione terrestre, questo metallo fuso potrebbe svolgere la stessa funzione del conduttore in movimento in una dinamo, che rafforza un campo magnetico già presente e lo mantiene nel tempo.

Il comportamento delle correnti elettriche e dei campi magnetici in conduttori elettrici in movimento - quali i fili metallici o i metalli fusi - viene determinato da tre leggi fondamentali dell'elettrodinamica: ogni conduttore elettrico percorso da corrente è circondato da linee di forza di campo magnetico; nei conduttori che vengono mossi trasversalmente rispetto alle linee di forza di un campo magnetico, viene indotta una tensione e scorre una corrente; infine, nei fluidi buoni conduttori elettrici, come alcuni metalli fusi, le linee di forza del campo magnetico sono come «congelate» nella materia e si muovono come fasce elastiche assieme a essa.

In particolare le linee di forza possono essere distese, attorcigliate o piegate dal moto del flusso. Inoltre questo stiramento produce un lavoro meccanico che altera il campo magnetico, facendo aumentare l'energia del campo magnetico dovuta all'energia cinetica del flusso. Gli specialisti chiamano questo processo «effetto alfa» (*si veda la finestra a pagina 70*).

> Attualmente l'**intensità del campo magnetico** oscilla e diminuisce ogni anno dello 0,07 per cento

Luce polare
Nucleo solido
Nucleo fluido
Mantello viscoso
Crosta solida
Linee di campo magnetico
Movimento spiraliforme interno
Movimento spiraliforme esterno
Cilindri convettivi
Nucleo fluido
Equatore come piano di simmetria
Mantello viscoso
Reinhold Henkel/ «Spektrum der Wissenschaft»

QUANDO LE PARTICELLE DEL VENTO SOLARE VENGONO CATTURATE DAL CAMPO MAGNETICO TERRESTRE, intorno ai poli si formano brillanti anelli di luce (*nella pagina a fronte*). La vera causa di questo fenomeno si trova nelle profondità della Terra: nel nucleo esterno, composto di ferro fluido fuso, si formano flussi cilindrici (*a sinistra*) dovuti alle differenze di densità e alla rotazione della Terra. All'interno di questi cilindri di convezione il metallo fuso si muove a spirale verso l'interno o verso l'esterno. Questi flussi di materiale conduttore formano una dinamo terrestre che produce un campo magnetico la cui forza si mantiene. Alla fine degli anni settanta Charles Carrigan e Friedrich Busse dimostrarono come possano formarsi flussi cilindrici nella regione fluida del nucleo della Terra. Essi misero in rapida rotazione un fluido racchiuso fra un guscio sferico interno raffreddato e un guscio esterno riscaldato (*qui sopra, a sinistra*). L'azione congiunta delle forze ascensionali e delle forze di Coriolis generava nel fluido un flusso cilindrico visibile sotto forma di striature chiare (*a destra*).

IN SINTESI

- Da almeno 3 miliardi di anni la Terra possiede un campo magnetico, soggetto a fluttuazioni sia rapide sia a lungo termine; uno dei principali problemi geofisici riguarda i meccanismi con i quali il campo si mantiene nonché le cause delle sue variazioni.
- Da tempo è stata avanzata l'ipotesi della dinamo, secondo la quale il campo magnetico sarebbe generato da moti di materia elettricamente conduttrice nel nucleo terrestre. Grazie soprattutto allo studio delle onde sismiche, si conosce abbastanza bene la struttura interna del pianeta; in particolare si è stabilito che il nucleo è costituito da un nocciolo metallico solido circondato da uno strato fluido. È all'interno di quest'ultimo che si formano le strutture convettive ritenute all'origine del campo.
- Diversi gruppi di ricerca si sono dedicati alla verifica sperimentale del modello della geodinamo; particolarmente convincente è quella realizzata dal gruppo degli autori, che ha fornito la prova della formazione di un campo magnetico permanente a opera di correnti vorticose in un conduttore quasi omogeneo. Essa è un importante punto di partenza per allestire esperimenti in condizioni ancora più vicine al modello terrestre.

Un ulteriore meccanismo geofisico rilevante, che può rafforzare un debole campo magnetico, interviene quando un flusso conduttore esposto a forze di taglio viene portato ad assumere una forma «a bobina». Sperimentalmente un flusso di questo tipo si produce quando si riempie con un liquido lo spazio fra due gusci sferici concentrici che ruotano a velocità diverse. Si parla in questo caso di «effetto omega». Se all'effetto omega si sovrappone un processo alfa, generato da un ulteriore moto vorticoso all'interno del flusso «a bobina», il ciclo di auto-alimentazione è completato. In questa situazione i fisici parlano di «dinamo alfa-omega».

Nel nucleo di metallo fuso della Terra sono probabilmente attivi entrambi questi processi. I meccanismi cinematici della dinamo appena esposti sono però troppo semplici per rendere conto di tutte le proprietà osservate del campo magnetico terrestre. Si devono prendere in considerazione anche i processi termodinamici all'interno di una massa di metallo fuso che scorre.

Pur potendo eseguire misurazioni dirette solo nella crosta terrestre fino a pochi chilometri di profondità, i geofisici sono riusciti a ottenere rappresentazioni abbastanza dettagliate della struttura interna del nostro pianeta, grazie ad accurate analisi delle onde sismiche che ne percorrono l'interno e a stime termodinamiche generali.

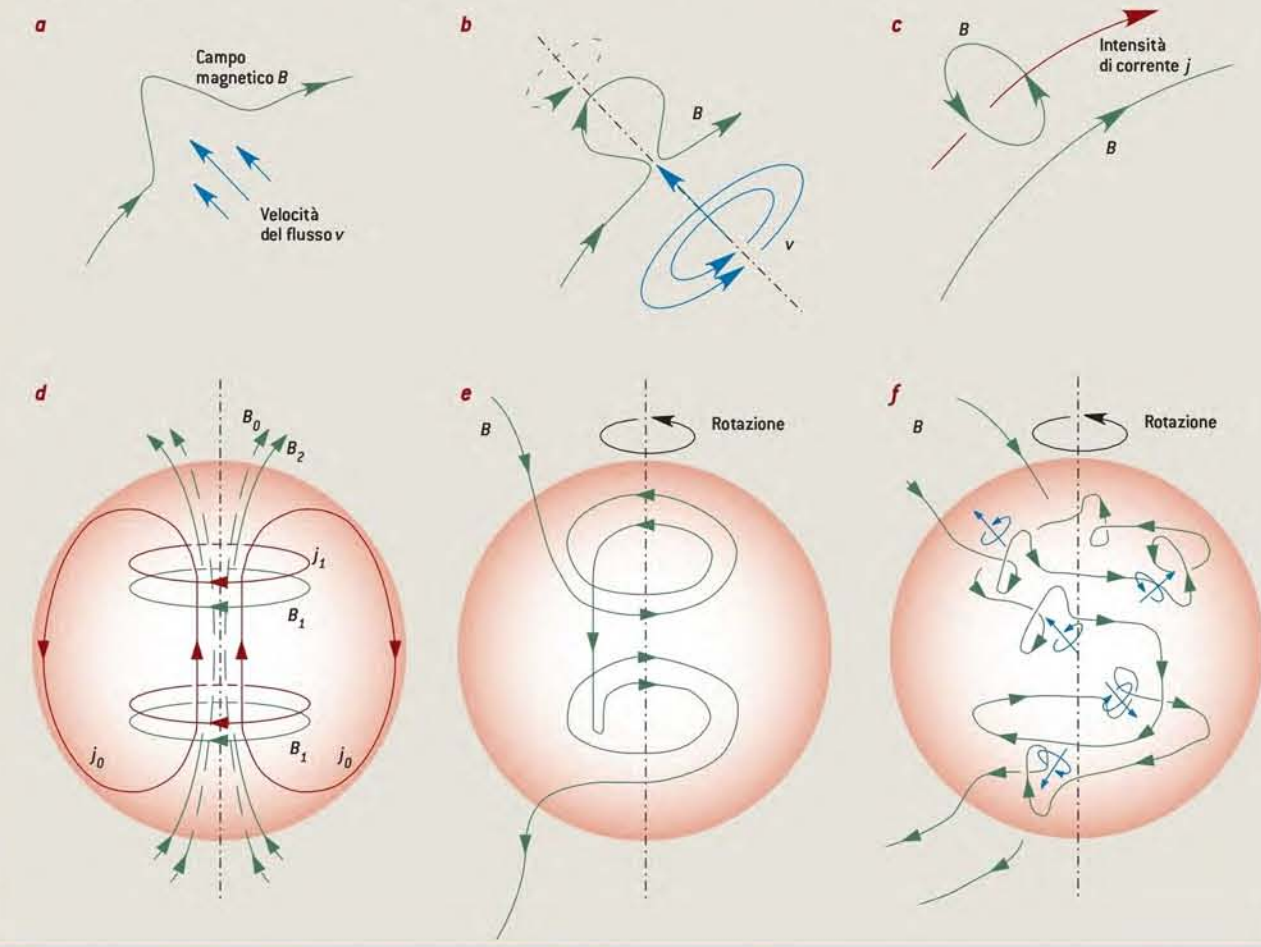
Così dal bilancio termico alla superficie terrestre e dalle stratificazioni di densità all'interno della Terra si possono trarre conclusioni sulla pressione e temperatura del nucleo. Qui la pressione raggiunge circa 3,5 miliardi di ettopascal (cioè 3,5 milioni di volte la pressione atmosferica al livello del mare), mentre la temperatura raggiunge i 6300 gradi Celsius.

La parte interna del nucleo ha un raggio di circa 1200 chilometri ed è costituita da ferro e nichel solidi. Essa è circondata da un guscio spesso circa 2700 chilometri, costituito da una lega metallica fluida di ferro con piccole quantità di nichel, zolfo, silicio e ossigeno. La struttura metallica conferisce naturalmente al nucleo una buona conducibilità elettrica e termica. Intorno al nucleo si stringe il mantello, con uno spessore complessivo di circa 2900 chilometri, che è formato essenzialmente da composti di elementi leggeri come silicio, ossigeno e magnesio. La conducibilità elettrica e termica di questi materiali è bassa. Il mantello è anch'esso suddiviso in numerosi strati viscosi o plastici di diversa composizione. Al contrario

Come si auto-rafforza un campo magnetico

In un fluido conduttore le linee di forza di un campo magnetico possono essere deformate dai campi collegati ai flussi (*a*) e persino «corto-circuitate» in anelli chiusi su se stessi (*b*). La linea di campo chiusa è a sua volta connessa con una corrente elettrica (*c*) che, in opportune condizioni, può scorrere in direzione parallela al campo magnetico originario. Questo processo viene chiamato dai fisici «effetto alfa».

Se il processo si ripete dove c'è già una linea di forza chiusa, il campo magnetico originario si rafforza grazie a un lavoro meccanico che ne altera le linee di forza (*d*). Questo è un elemento fondamentale del processo della dinamo.

All'auto-rafforzamento del campo magnetico può concorrere anche un secondo effetto, che si verifica quando in un vortice di flusso, su cui agiscano forze di taglio, le linee di campo magnetico sono portate ad assumere una forma a bobina (*e*). Sperimentalmente, a quest'ultimo effetto, detto «effetto omega», si sovrappone un effetto alfa, e così il ciclo di auto-rafforzamento si chiude (*f*).

del nucleo esterno molto fluido, però, il mantello non ha alcuna rilevanza per il meccanismo della dinamo.

Moti convettivi

Più che la struttura statica della Terra, per il fenomeno della dinamo sono significativi i movimenti che avvengono nella parte fluida del nucleo. Le profonde differenze di temperatura e composizione chimica del metallo fuso determinano gradienti di densità che generano correnti ascensionali. Questi moti convettivi sono stimolati soprattutto dalle differenze di composizione chimica, che si rinnovano di continuo poiché i componenti più pesanti del fluido metallico si solidificano sullo strato esterno del nucleo solido. In questo modo un sottile strato adiacente si arricchisce di componenti più leggeri che nel campo gravitazionale cominciano a salire. Il solidificarsi del fluido metallico sul nucleo solido interno è causato da un raffreddamento continuo del nostro pianeta: esso irradia alla superficie 0,08 watt termici per metro quadrato.

Senza la rotazione della Terra lo scambio convettivo di calore e materia nella zona fluida avverrebbe essenzialmente in direzione radiale e alla velocità, relativamente bassa, di circa un millimetro al secondo. A causa della rotazione del pianeta, che nel nucleo fluido raggiunge una velocità media dai 10 ai 30 metri al secondo, nascono invece intense forze di Coriolis che perturbano i moti ascensionali della materia fusa. Negli anni settanta, quando si trovava all'Università della California a Los Angeles, Friedrich Busse, ora all'Università di Bayreuth, ha mostrato che in questa situazione si sviluppano strutture di flusso ordinate che assumono la forma di cilindri convettivi con assi orientati parallelamente all'asse di rotazione della Terra (*si veda il grafico di destra dell'illustrazione alle pagine 68-69*).

Questi cilindri convettivi formano un anello intorno al nucleo solido della Terra. A seconda dell'intensità dei moti di rotazione e di convezione essi possono anche presentarsi disposti in numerosi strati. Ciascun cilindro di convezione è delimitato da una parete «solida» di materiale plastico molto denso appartenente al mantello. Il rallentamento del moto di convezione in prossimità di questo margine provoca un flusso diretto verso il centro del cilindro. In questo modo, vicino all'asse del cilindro si stabilisce un flusso spiraliforme diretto verso il basso, che viene ulteriormente rafforzato da forze di taglio. Questi fenomeni si sviluppano simmetricamente negli emisferi sud e nord. Nel complesso, nel nucleo esterno di metallo fluido e conduttore dovrebbe comparire una distribuzione relativamente ordinata di vortici di flusso con una struttura spiraliforme della velocità.

I CILINDRI CONVETTIVI FORMATI DA UNA GEO-DINAMO IN UN GUSCIO SFERICO ROTANTE (in una simulazione al computer eseguita dai ricercatori dell'Università di Bayreuth) vengono appiattiti lungo la sezione trasversale in modo spiraliforme (*a sinistra*). Le superfici con uguali velocità in direzione radiale sono rappresentate, nella parte inferiore della figura, in modo tridimensionale e, nella parte superiore, lungo un piano meridiano. Si noti che linee dotate di uguale componente radiale del campo magnetico a livello della superficie esterna del guscio non corrono parallele all'equatore ma, per effetto del trasporto del singolo cilindro convettivo, sono deformate in modo ondulatorio (*a destra*). Il blu indica valori negativi, il rosso valori positivi della componente radiale del campo magnetico. Il verde chiaro rappresenta il campo magnetico di intensità nulla.

In un fluido buon conduttore elettrico le linee di forza del campo magnetico sono come congelate

Charles Carrigan e Friedrich Busse riuscirono a confermare in modo convincente questi modelli grazie agli esperimenti che realizzarono alla fine degli anni settanta all'Università della California a Los Angeles. In questi esperimenti Carrigan mise in rapida rotazione (circa 1000 giri al minuto) un liquido che riempiva una cavità a forma di guscio sferico. Riscaldando la superficie esterna e raffreddando quella interna produsse un gradiente di temperatura in grado di innescare una corrente di convezione termica. Parallelamente all'asse di rotazione del liquido si formarono vortici cilindrici (*si veda l'illustrazione a destra a pagina 69*).

Un siffatto sistema di vortici può indurre e mantenere un campo magnetico? Per analizzare sistematicamente il problema si è dovuto aspettare di disporre di computer dotati di elevatissime prestazioni. Negli ultimi 10 anni gruppi di ricerca negli Stati Uniti, in Giappone, in Germania e nel Regno Unito hanno cercato di sviluppare simulazioni numeriche dei processi magneto-fluidodinamici che avvengono all'interno della Terra, ottenendo notevoli successi nella modellizzazione dei complessi sistemi di flussi, moti rotatori, correnti elettriche e campi magnetici. Oggi disponiamo così di una descrizione dettagliata dell'effetto dinamo per strutture la cui geometria e composizione corrisponde a quella della Terra.

Tuttavia la capacità di calcolo dei più potenti computer non è ancora sufficiente per simulare gli andamenti reali all'interno della Terra alle scale temporali più interessanti dal punto di vista geofisico, quelle che vanno da alcuni giorni fino a circa 10 milioni di anni, e alle scale di lunghezza da 10 a 3500 chilometri. Ciò nonostante si arriva a descrivere sorprendentemente bene tutto un insieme di effetti geomagnetici fondamentali e molti fenomeni relativi alle correnti interne. Gary Glatzmaier del Los Alamos National Laboratory e Paul Roberts dell'Università della California a Los Angeles presentarono nel 1995 una prima simulazione del campo magnetico dipolare della Terra (*si veda l'illustrazione a pagina 66*), in cui inclusero anche l'inversione di polarità e la deriva a ovest del campo magnetico.

Diversi gruppi di ricerca, fra cui quello di Friedrich Busse, Andreas Tilgner e Eike Grote dell'Università di Bayreuth, tentano di calcolare accuratamente l'interazione fra correnti convettive in gusci sferici e campi magnetici autoalimentati. Ne emergono due fenomeni: lungo la sezione trasversale i cilindri convettivi vengono appiattiti con andamento spiraleggiante dalle forze di Coriolis e, alle medie latitudini, le linee di forza del campo magnetico di zona vengono deformate secondo uno schema ondulatorio per l'effetto di trasporto dei singoli cilindri convettivi (*si veda l'illustrazione in questa pagina*).

La dinamo simulata

Considerazioni teoriche hanno mostrato che la verifica sperimentale dei meccanismi della geodinamo può essere ottenuta solo con un grande sforzo sperimentale e accettando alcune deviazioni dal modello geofisico. Per esempio le forze ascensionali che nella Terra mettono in moto la convezione devono essere sostituite, nell'esperimento, da pompe o agitatori a elica. In questo modo al reale problema geofisico della dinamo subentra un «problema cinematico» della dinamo in cui si ha a che fare con vortici simulati.

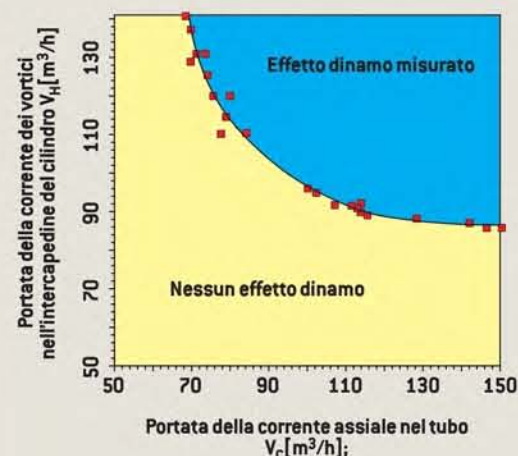
Il problema cinematico si avvicina tanto più a quello geofisico quanto più il campo di flusso simulato nell'esperimento somiglia a quello del nucleo fluido della Terra, e ciò dipende dal tipo di fluido utilizzato e dalle sue proprietà elettriche, termiche e fluidomeccaniche, come pure dalle prestazioni della pompa o, meglio, dell'agitatore. Nella messa a punto dell'apparato sperimentale bisogna dunque assicurarsi che l'incremento dell'energia magnetica, conseguente all'allungamento e alla torsione meccanici delle linee di forza del campo magnetico, sia superiore al suo annullamento dovuto alla corrente elettrica nelle resistenze ohmiche dei materiali.

Un indice utile a questo scopo è il cosiddetto numero di Reynolds. Si tratta di

Portata della corrente dei vortici nell'intercapedine del cilindro $V_H[m^3/h]$

Effetto dinamo misurato

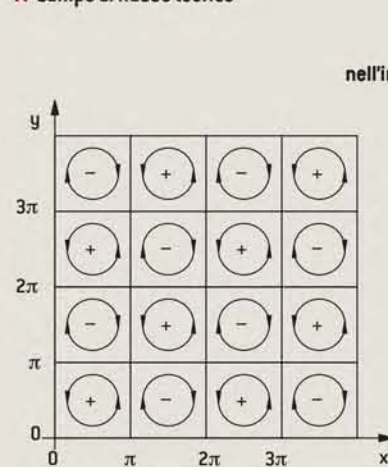
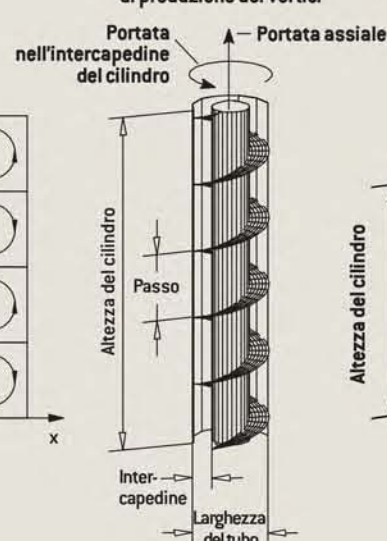
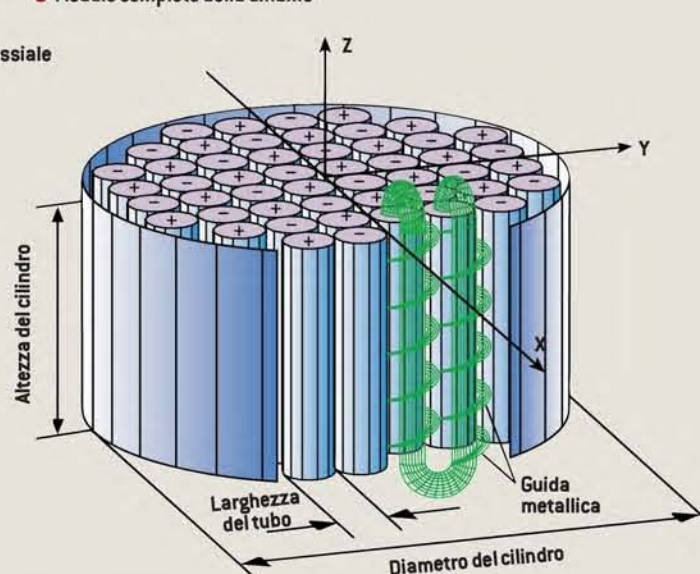
Nessun effetto dinamo

Portata della corrente assiale nel tubo $V_C[m^3/h]$;

La dinamo di Karlsruhe

Per simulare sperimentalmente la dinamo terrestre, era necessario un complesso apparato sperimentale. Un campo di flusso, proposto da Glyn Roberts dell'Università di Newcastle upon Tyne, forniva le basi teoriche dell'esperimento: vortici rotanti verso destra e verso sinistra si alternano in modo ordinato formando un reticolo periodico; inoltre, in essi il fluido scorre in modo alternato verso l'alto e verso il basso (*a*). A partire da questo modello, Friedrich Busse dell'Università di Bayreuth e gli autori hanno sviluppato un programma per realizzare tecnicamente l'esperimento: all'interno di un cilindro di circa due metri di diametro (*c*) sono installate 52 celle che generano i vortici (*b*). In (*c*) sono anche mostrate, per due di queste celle (*in verde*) la struttura interna e i tubi incurvati di collegamento alle loro estremità. Le lamiere guida provvedono a determinare l'andamento spiraliforme del flusso.

Su questa base i gruppi di lavoro del Centro di ricerca di Karlsruhe hanno realizzato l'esperimento. Esternamente, il modulo dinamo ha forma cilindrica (*fotografia a sinistra*) e contiene 52 generatori di vortici, che sono accoppiati con i tubi incurvati in modo da produrre un circuito chiuso (*fotografia a destra*). All'interno dell'apparato è stato pompato sodio fluido con una portata da 50 a 150 metri cubi all'ora. Due pompe mettono in moto le correnti dei vortici, una terza la corrente in direzione assiale.

A grandi portate si forma un buon campo magnetico, la cui intensità varia a causa delle turbolenze nel flusso di sodio, ma è mediamente stazionaria nel tempo. Questo campo è circa 100 volte più intenso del campo magnetico terrestre.

L'instaurarsi di un'auto-alimentazione del campo magnetico dipende dalla combinazione della portata del flusso nelle correnti dei vortici e in quelli assiali. L'esperimento è stato condotto variando questi parametri. I ricercatori di Karlsruhe hanno così potuto ottenere un diagramma che definisce le condizioni di auto-alimentazione del campo magnetico.

Forschungszentrum Karlsruhe

un indice adimensionale che è funzione della velocità media del flusso del conduttore fluido (una grandezza tipica dei vortici di corrente) e di due proprietà dei materiali, la conducibilità elettrica e la permeabilità magnetica. Il numero di Reynolds magnetico descrive il comportamento dell'energia prodotta e persa nel campo magnetico.

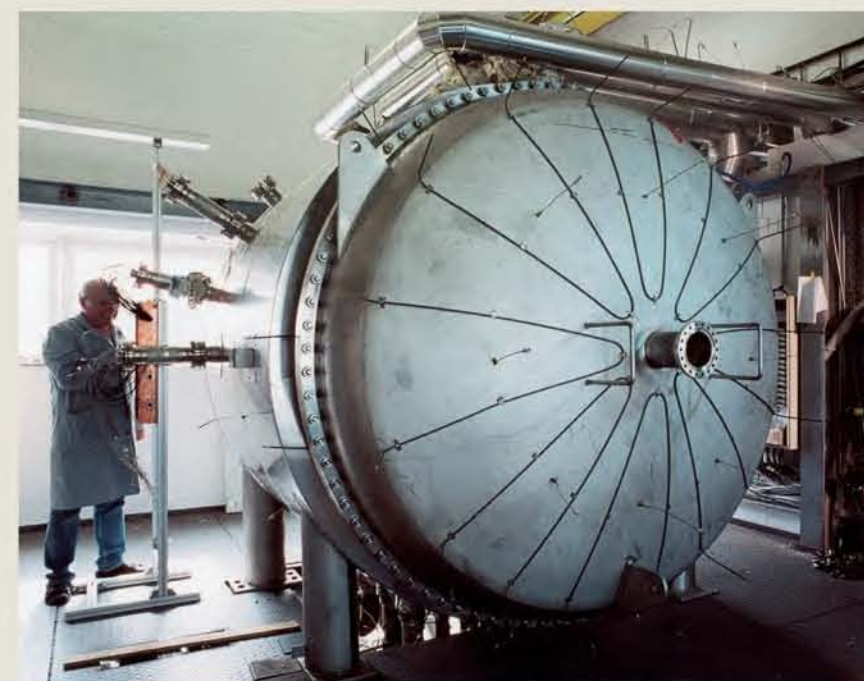
Affinché l'esperimento fornisca una chiara prova dell'effetto dinamo, questo indice deve assumere un valore ampiamente superiore a 1. A questo scopo si sceglie un fluido metallico dotato di alta conducibilità elettrica, bassa viscosità e bassa temperatura di fusione. Il sodio, che a temperature superiori ai 97 gradi Celsius è liquido, ha queste proprietà. Ne segue che l'apparato sperimentale deve contenere uno o più metri cubi di fluido e produrre in esso correnti con velocità da 5 a 20 metri al secondo. Finora due gruppi di lavoro hanno condotto con successo esperimenti di queste dimensioni: uno all'Istituto di fisica di Riga, in Lettonia, l'altro nel Centro di ricerca di Karlsruhe.

Nel 1987 il gruppo di ricerca lettone, diretto da Agris Gailitis, aveva tentato di dimostrare l'effetto dinamo su un unico vortice spiraliforme circondato da sodio fluido a riposo. Un siffatto campo di velocità corrisponde al vortice di un singolo cilindro convettivo nel nucleo terrestre. Tecnicamente, esso fu realizzato collocando all'interno di un grosso tubo un generatore di torsione a guide metalliche. L'apparato era azionato da una pompa magneto-fluidodinamica che aveva una portata di 1200 metri cubi all'ora, e il fluido sperimentale tornava all'imbocco del tubo scorrendo lungo un rivestimento esterno.

Gailitis e colleghi riuscirono così a mostrare che un campo magnetico variabile applicato dall'esterno viene rafforzato dalla corrente spiraliforme di sodio e che, dopo lo spegnimento della sorgente esterna, la scomparsa del campo magnetico si verifica in modo sensibilmente rallentato. Era un chiaro segno che presto sarebbe stato possibile raggiungere le condizioni critiche per l'auto-alimentazione di un campo magnetico.

Il gruppo lettone avrebbe certamente potuto raggiungere il risultato, ma un errore meccanico impedì il conseguimento di uno stato attivo di dinamo. In un secondo esperimento Gailitis, in collaborazione con Gunter Gerbeth del Politecnico di Dresda, mise a punto una situazione sperimentale analoga, ma leggermente semplificata, riuscendo a produrre un campo magnetico auto-alimentato, oscillante in modo quasi periodico. Per la prima volta era stato dimostrato sperimentalmente l'effetto omogeneo della dinamo.

Un'interessante somiglianza con il campo di flusso del nucleo fluido della Terra la esibisce il modello proposto da Glyn Roberts dell'Università di Newcastle upon Tyne (Gran Bretagna): a un campo di velocità a vortici rotanti in modo alternato verso destra e verso sinistra, è sovrapposta una velocità assiale di direzione alternante. Friedrich Busse ha modificato il campo di velocità di Roberts, considerandolo all'interno di un cilindro di dimensione finita. Secondo Busse questa disposizione dovrebbe rendere conto delle strutture di vortici all'interno di pianeti rotanti. Secondo i calcoli del teorico di Bayreuth, in questo flusso l'auto-alimentazione magnetica dovrebbe comparire per numeri di Reynolds magnetici relativamente bassi, intorno a 10. Busse tracciò anche le linee di un esperimento, in cui il campo di correnti poteva essere prodotto da pompe applicate esternamente nei generatori di vortici. Un apparato per ottenere questi valori richiedeva un recipiente cilindrico di un metro di raggio e un metro di altezza, e il fluido di sodio al suo interno doveva raggiungere una velocità di scorrimento di circa 5-10 metri al secondo per 52 celle di vortici.

Forte di una lunga esperienza di lavoro con flussi di sodio liquido, il nostro gruppo presso il Centro di ricerca di Karlsruhe iniziò a sviluppare un apparato sperimentale simile nel 1992. L'elemento centrale è

GLI AUTORI

ULRICH MÜLLER, docente di meccanica dei fluidi al Politecnico di Karlsruhe, ha diretto fino all'aprile 2000 l'Istituto di tecnica nucleare ed energetica del Centro di ricerca di Karlsruhe.
ROBERT STIEGLITZ è direttore di progetto all'Istituto di tecnica nucleare ed energetica del Centro di ricerca di Karlsruhe e ne dirige l'esperimento di geodinamo.

il «modulo-dinamo», che è costituito da 52 generatori di vortici, completati da tubi incurvati alle cui estremità si produce il campo di velocità proposto da Busse. Nel modulo il flusso viene ottenuto tramite un circuito di alimentazione sostenuto da tre pompe magneto-fluidodinamiche: due mettono in moto la corrente dei vortici, la terza genera la corrente assiale. L'apparato entrò in funzione nel 1999.

Come ci aspettavamo, a una portata di sodio di circa 120 metri cubi all'ora nei canali di flusso dei generatori di vortici si stabilì un esteso campo magnetico in media stazionario nel tempo. Questo campo è circa 100 volte più intenso del campo magnetico terrestre. Come il modello terrestre, esso presenta una struttura dipolare, in cui l'allineamento del dipolo è trasversale all'asse del modulo-dinamo.

L'innesco dell'effetto dinamo e l'allineamento del campo magnetico sono in buon accordo con le previsioni teoriche sviluppate per questo assetto sperimentale da Andreas Tilgner dell'Università di Bayreuth (ora all'Università di Gottinga) e da Karl Heinz Rädler dell'Istituto di astrofisica di Potsdam. Con un'abile scelta delle condizioni iniziali dell'esperimento siamo anche riusciti a produrre un campo magnetico con allineamento opposto. Variando, in un gran numero di prove, i parametri relativi alle componenti assiali e spiraliformi dei flussi, siamo riusciti a tracciare un diagramma che specifica le condizioni di innesco dell'auto-alimentazione dell'effetto dinamo (*si veda il grafico in alto a sinistra nella finestra a pagina 72*).

Verso un maggiore realismo

I nostri esperimenti nel Centro di ricerca di Karlsruhe forniscono la chiara prova sperimentale che correnti vorticose in un conduttore quasi omogeneo possono produrre spontaneamente un campo magnetico permanente. E confermano al contempo, in virtù dell'analogia con le ipotizzate strutture di corrente nel nucleo terrestre, il modello di una geo-dinamo.

Prima però che gli esperimenti di Riga e di Karlsruhe possano essere considerati una dimostrazione realmente soddisfacente della geo-dinamo, vanno superate due carenze dell'apparato sperimentale. In primo luogo, il sodio liquido non scorre liberamente, ma entro stretti canali. In questo modo il campo magnetico, una volta prodotto, può ripercuotersi solo in misura ridotta, attraverso la forza di Lorentz, sul flusso e modificarne la forma. In secondo luogo, il flusso viene messo in moto dall'esterno e non è generato da forze ascensionali.

L'esigenza di una migliore comprensione dell'accoppiamento a reazione fra campo magnetico prodotto e flusso sta dando vita, sia in Europa sia negli Stati Uniti, a ulteriori programmi sperimentali. In essi vengono impiegati contenitori di forma sferica o cilindrica, nei quali - attraverso eliche messe in moto dall'esterno - si ottengono vortici circolari spiraliformi. Le dimensioni del contenitore sono scelte in modo che, ottenuti vortici di una certa intensità, si dovrebbe osservare l'effetto dinamo.

Il campo magnetico generato potrebbe quindi influire sulla corrente vorticosa che si è sviluppata liberamente in maniera più significativa di quanto non accada con quella costretta nei canali delle dinamo di Riga e Karlsruhe. Tuttavia è tecnicamente difficile, per quanto riguarda il flusso, produrre un campo di velocità libero che assomigli al modello geofisico tanto quanto quello adottato nell'esperimento di Karlsruhe.

Un esperimento progettato da Daniel P. Lathrop dell'Università del Maryland a College Park sembra particolarmente promettente. Il gruppo di ricerca di Lathrop tenta di modificare nelle dimensioni, nei materiali e nei parametri sperimentali l'apparato di Carrigan e Busse, in modo da raggiungere l'auto-alimentazione del campo magnetico. Il sodio liquido è posto fra due gusci sferici di titanio. Il guscio interno viene raffreddato lungo l'asse centrale con un liquido di raffreddamento, quello esterno riscaldato tramite pannelli radianti. I due gusci e il fluido vengono poi posti in rapida rotazione, fino a centinaia di giri al secondo. In queste condizioni nel sodio si formano cilindri di convezione.

Se questo apparato sperimentale potesse raggiungere certe condizioni - ossia forze ascensionali termiche adeguate e un numero di giri sufficientemente elevato - le condizioni di auto-alimentazione del campo magnetico dovrebbero essere molto simili a quelle reali all'interno della Terra. I prossimi anni mostreranno se si riuscirà a realizzare queste condizioni.

BIBLIOGRAFIA

GLATZMAIER GARY A. e ROBERTS PAUL H., *A Three-Dimensional Self-Consistent Computer Simulation of a Geomagnetic Field Reversal* in «Nature», 377, p. 203, 1995.

TILGNER ANDREAS, BUSSE FRIEDRICH e GROTE EIKE, *Experimente zum Dynamo-Effekt* in «Sterne und Weltraum», n. 4, p. 230, 2000.

I rischi dell' ALTA MONTAGNA

di Ivana Gritti,
Maurizio Mariotti
e Giulio Sergio Roi

In chi non è acclimatato, l'alta quota provoca disturbi che vanno da prestazioni atletiche ridotte, modeste alterazioni del sonno e cefalea a edemi polmonari e cerebrali che possono mettere a repentaglio la vita

Foto Dario Ferro

UNO *SKYRUNNER* (*nella pagina a fronte*) impegnato nella maratona di Tingri a 4300 metri di altitudine. Solo un adeguato periodo di acclimatazione a quote intermedie consente di sviluppare gli stessi adattamenti fisiologici delle popolazioni che vivono abitualmente in alta quota. Qui a fianco, una donna aymarà al lavoro presso il lago Titicaca, al confine tra Bolivia e Perù, a 3800 metri di altitudine.

Foto Cattaneo - Trifoni

Oggi più di 40 milioni di persone, in diverse parti del mondo, vivono e lavorano a quote comprese tra i 3000 e i 5500 metri di altitudine sul livello del mare. Essi sono perfettamente acclimatati e non presentano disturbi particolari. Diversa è la situazione degli individui che si espongono bruscamente e senza un'adeguata preparazione all'alta quota: non essendo acclimatati, possono presentare manifestazioni patologiche - il cosiddetto mal di montagna - che in alcuni casi possono portare alla morte. La principale difficoltà per la vita in alta quota è data dalla minore pressione barometrica che, a sua volta, riduce la pressione parziale dell'ossigeno nei gas inspirati. Tale condizione, che i fisiologi chiamano ipossia ipossica, viene affrontata dall'individuo con un insieme di modificazioni fisiologiche che avvengono immediatamente (nel caso dell'acclimatazione acuta) o nel lungo periodo (nel caso dell'acclimatazione cronica). È evidente che l'entità dei processi di adattamento dipende dalla quota di esposizione e dalla rapidità con cui la si raggiunge. Una buona acclimatazione alle quote intermedie è il presupposto per affrontare nelle migliori condizioni possibili le quote più elevate. Per questo gli alpinisti sono soliti progredire per tappe più o meno brevi durante le loro escursioni in alta montagna.

Gli effetti della carenza di ossigeno

L'effetto più importante dell'ipossia dovuta all'alta quota è la ridotta capacità di lavoro, dipendente dalla diminuita possibilità di utilizzare i processi metabolici aerobici, per risintetizzare il combustibile cellulare (l'adenosintrifosfato, in sigla ATP) necessario alla contrazione muscolare prolungata nel tempo. In pratica in alta quota si va più adagio, come dimostra la tabella a pagina 80, che riporta i risultati delle migliori prestazioni mondiali sulla maratona a quote comprese tra 0 e 5200 metri.

Il tessuto che più di tutti risente dell'ipossia è quello nervoso e la sua sofferenza si manifesta con una perdita dell'eccitabilità dei neuroni. Il fenomeno colpisce anche i neuroni centrali bulbari, che sono coinvolti nell'aumento della ventilazione polmonare che si instaura come meccanismo di acclimatazione acuta. In realtà la risposta ventilatoria all'ipossia è mediata dai chemocettori arteriosi periferici. Tali recettori inviano una scarica verso i recettori bulbari, che reagiscono aumentando la ventilazione per favorire il ricambio dell'aria a livello degli alveoli polmonari e quindi aumentare la pressione parziale dell'ossigeno alveolare. Quando un individuo non acclimatato viene a trovarsi in condizioni di ipossia, si attivano anche i meccanismi che riducono l'eccitabilità dei neuroni respiratori; di conseguenza la ventilazione effettiva sarà il risultato combinato di stimoli eccitatori e inibitori.

Con l'acclimatazione alla quota, aumenta progressivamente la ventilazione a riposo, per effetto di un ritorno del controllo da parte dei chemocettori cerebrali, sensibili alle variazioni di anidride carbonica. Ciò è possibile in quanto il fluido cerebrospinale e quello che riempie gli spazi tra cellula e cellula aumentano la loro acidità e i più bassi livelli di anidride carbonica, conseguenti all'iperventilazione indotta dai chemocettori periferici, producono una quantità di ioni idrogeno sufficiente a stimolare adeguatamente i chemocettori cerebrali. Infatti, l'ipossia tende a provocare quasi immediatamente un'iperventilazione che porta ad abbassare la pressione parziale del biossido di carbonio, mentre l'alcalosi viene compensata da una maggiore produzione di bicarbonato a livello renale.

È un dato di fatto che l'iperventilazione rappresenta la risposta fisiologica finalizzata a una migliore ossigenazione del sangue; tuttavia nelle popolazioni residenti in alta quota è stata rilevata una risposta all'ipossia significativamente meno marcata di quella di chi vive a livello del mare. È dunque possibile che, tra chi vive in alta quota, si siano selezionati gli individui che risentono meno delle condizioni di ipossia, anche se alcuni ricercatori sostengono che le migliori prestazioni in alta quota sono dovute a una risposta più energica sotto forma di iperventilazione.

Sonni disturbati

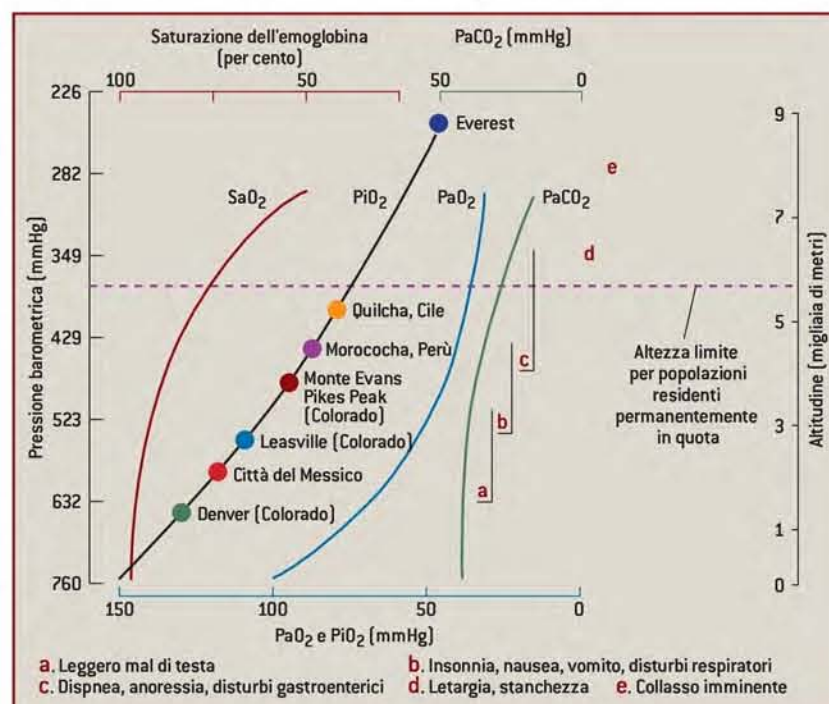
Molti individui riferiscono una scarsa qualità del sonno ad altitudini attorno a 3000 metri e la maggior parte delle persone lamenta un sonno disturbato sopra i 4200 metri. Il sintomo più comune è dato dai frequenti risvegli, accompagnati dalla sensazione di mancanza d'aria. Tali risvegli si verificano al termine di una fase di apnea (dovuta all'alcalosi legata alla ridotta pressione parziale di biossido di carbonio nel sangue) e prima dell'inizio della successiva fase di iperpnea (indotta dall'ipossia). Queste due fasi si alternano, cosicché la respirazione nel sonno assume andamento periodico. Il risultato è una scadente qualità del sonno, ulteriormente peggiorata dalla diversa distribuzione delle sue fasi: vi è infatti una maggiore durata delle fasi di risveglio e della fase 1 e una minor durata delle fasi di sonno profondo. La lunghezza del sonno REM (quello nel quale si sogna) non sembra invece complessivamente modificata.

I numerosi risvegli durante il sonno eserciterebbero un effetto protettivo nei confronti dell'eccessivo calo della saturazione dell'emoglobina. Farmaci quali l'acetazolamide (un diuretico usato anche per prevenire il mal di montagna) agiscono sulla respirazione periodica, migliorando la saturazione dell'emoglobina.

Come cambia l'elettroencefalogramma

Studi elettroencefalografici da noi condotti a riposo, in stato di veglia, dopo 32-38 ore di esposizione acuta a un'altitudine di 3680 metri hanno evidenziato che le attività elettroencefalografiche (EEG) elevate, tipiche della veglia, risultavano signifi-

SUBITO DOPO LA MARATONA svolta sul Tingri Plateau (a 4300 metri di quota) l'atleta viene trasferito in una tenda-laboratorio, allestita nelle immediate vicinanze dell'arrivo, per un'attenta valutazione dei suoi parametri fisiologici.

Il grafico in basso mostra le variazioni delle condizioni ambientali e delle variabili fisiologiche con l'aumentare dell'altitudine. (PaO_2, pressione parziale dell'ossigeno nel sangue arterioso; $PaCO_2$, pressione parziale del biossido di carbonio nel sangue arterioso; PiO_2, pressione parziale dell'ossigeno nell'aria inspirata; SaO_2, saturazione in ossigeno del sangue arterioso). Come si vede, al di sopra dei 5000 metri anche gli individui ben acclimatati possono incorrere in gravi disturbi.

IN SINTESI

- Quote superiori ai 3000 metri richiedono, in chi non vive abitualmente in quell'ambiente, un periodo di acclimatazione alle modificazioni fisiologiche legate all'ipossia, ossia a una diminuita pressione parziale dell'ossigeno atmosferico.
- Tra gli adattamenti fisiologici all'alta quota vi è l'iperventilazione, una riduzione della potenza aerobica e un cambiamento dell'attività elettrica cerebrale, tutti fenomeni che l'autrice e i suoi collaboratori hanno studiato in atleti che si sono allenati a quote superiori ai 4000 metri.
- In mancanza di un'adeguata acclimatazione si possono avere vari disturbi che vanno da un passeggero mal di montagna con cefalea, nausea e deterioramento dell'attenzione e delle facoltà cognitive a una sindrome assai più grave che, in rari casi, può arrivare all'edema polmonare e cerebrale.

CORTECCIA FRONTALE (F_3-P_3)
150 basale
150 post-esercizio (5-7')
150 post-esercizio (5-22')
3680 basale
4300 basale
4300 post-maratona (5-7')
4300 post-maratona (5-22')

CORTECCIA PARIETALE (A_2-P_3)
150 basale
150 post-esercizio (5-7')
150 post-esercizio (5-22')
3680 basale
4300 basale
4300 post-maratona (5-7')
4300 post-maratona (5-22')

CORTECCIA OCCIPITALE (O_1-O_2)
150 basale
150 post-esercizio (5-7')
150 post-esercizio (5-22')
3680 basale
4300 basale
4300 post-maratona (5-7')
4300 post-maratona (5-22')
50 µV
1 sec

TRACCIATI ELETTROENCEFALOGRAFICI, non filtrati, registrati in tre diverse aree della corteccia cerebrale di uno skyrunner, in stato di veglia, a occhi chiusi. Il primo tracciato è stato registrato a 150 metri sul livello del mare, in condizioni di riposo. Il secondo e il terzo sono stati registrati, sempre a livello del mare, dopo un esercizio incrementale massimale fino al raggiungimento della massima potenza aerobica. Il quarto è stato registrato a Lhasa in Tibet dopo 32-38 ore di esposizione acuta a una quota di 3680 metri. Il quinto è stato registrato a Tingri, in Tibet, dopo circa sei giorni di esposizione a una quota di 4100-4300 metri. Gli ultimi due tracciati rappresentano l'attività elettroencefalografica registrata subito e poco dopo la fine della maratona corsa a 4300 metri di altitudine sul Tingri Plateau nell'ottobre del 1998.

POTENZA ASSOLUTA DELLE BANDE A BASSA (THETA), MEDIA (ALFA), ALTA (BETA) E ALTISSIMA FREQUENZA (GAMMA) dell'attività elettroencefalografica registrata dalla corteccia frontale, parietale e occipitale, di cinque maratoneti. Come nei tracciati a sinistra, le registrazioni sono state eseguite a livello del mare in condizioni di riposo, tra 5 e 7 minuti dopo la fine di un esercizio incrementale massimale, tra 5 e 30 minuti dopo la fine dello stesso tipo di esercizio; a Lhasa (Tibet) dopo 32-38 ore di esposizione acuta a una altitudine di 3680 metri; sul Tingri Plateau (Tibet) dopo sei giorni di esposizione acuta a una altitudine di 4300 metri; tra 5 e 7 minuti dopo la fine della maratona corsa tra i 4100 e i 4300 metri sull'altopiano di Tingri; tra 5 e 22 minuti dopo la fine della maratona.

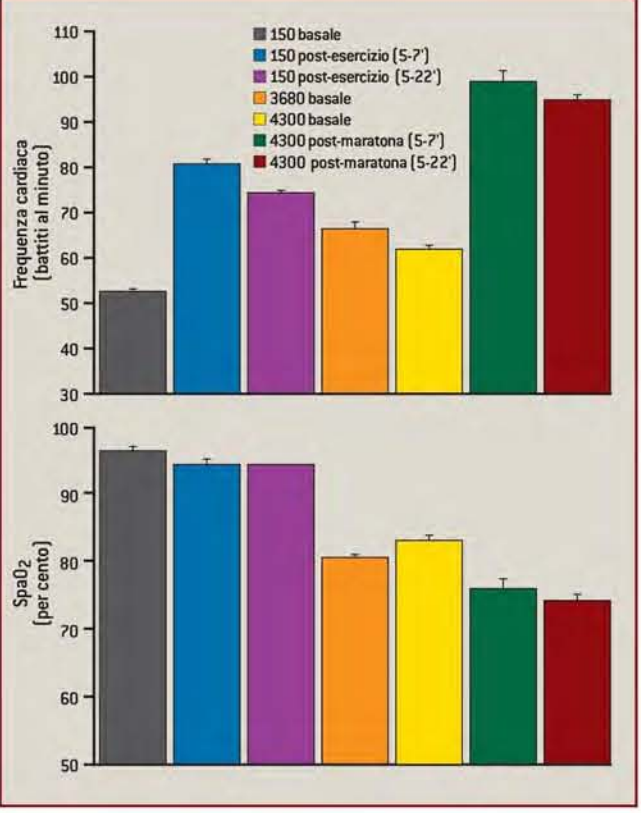
cativamente inferiori rispetto a quelle registrate a livello del mare. Per contro, l'attività EEG più lenta tipica dell'addormentamento e del sonno - osservabile in altitudine anche durante la veglia - risultava aumentata (*si vedano i grafici nella pagina precedente*). Dopo sei giorni di acclimatazione a 4300 metri di quota, si osservava una diminuzione significativa dell'attività EEG lenta e un aumento significativo delle bande di frequenza più elevate.

Questi dati fanno ritenere che la diminuzione delle attività elettrocorticali tipiche della veglia e l'aumento dell'attività lenta, tipica dell'addormentamento e del sonno, costituiscano una specifica reazione all'ipossia acuta, mentre con l'acclimatazione si passa a un incremento delle attività EEG ad alta e altissima frequenza tipiche della veglia, accompagnato dalla diminuzione delle attività tipiche dell'addormentamento e del sonno. Queste modificazioni costituiscono una tipica risposta all'ipossia cronica e sono dovute all'attivazione diretta e riflessa delle fibre nervose del sistema reticolare ascendente catecolamminergico del tronco encefalico, coinvolto sia nell'integrazione e nel controllo del comportamento, del metabolismo e dell'attività del sistema nervoso autonomo, sia nel risveglio elettrocorticale.

Questa ipotesi sarebbe in linea con i dati sperimentali che dimostrano come l'acclimatazione provochi una riduzione delle attività EEG lente e un aumento di quelle ad alta frequenza: nel risveglio, nell'allerta e nella desincronizzazione elettrocorticale dovuta a un'aumentata attività dei sistemi ascendenti catecolamminergici. Infatti, dopo 3-7 giorni di acclimatazione a 4300 metri di quota, si è osservato un aumento della secrezione delle catecolammine circolanti (adrenalina e noradrenalina).

Gli effetti dell'esercizio fisico di lunga durata in alta quota sono stati studiati immediatamente dopo una maratona disputata a Tingri, in Tibet, a 4300 metri di quota. L'intensità media della gara corrispondeva all'incirca al 60 per cento della massima potenza aerobica. Immediatamente dopo la gara abbiamo osservato una diminuzione significativa delle attività lente, soprattutto nelle aree corticali, occipitali e posteriori, mentre era presente un aumento significativo delle attività EEG a frequenza relativamente alta, alta e altissima (alfa, beta e gamma), soprattutto nelle aree anteriori, parietali e frontali. È interessante notare che queste modificazioni dell'attività elettroencefalografica sono simili a quelle che si verificavano subito dopo un esercizio incrementale massimale effettuato a livello del mare.

Le registrazioni EEG effettuate dopo circa 17 minuti dal termine della maratona in quota mostravano un rapido ritorno delle attività elettrocorticali ad alta e altissima frequenza, alle condizioni fisiologiche di base osservate dopo 6 giorni di acclimatazione, pur essendo ancora presente un aumento delle attività EEG lente (theta) e relativamente lente (alfa) nelle aree corticali anteriori. Il rapido ritorno alle condizioni basali di acclimatazione sembra essere una caratteristica peculiare degli atleti allenati a competere in prove di lunga durata in alta quota, i cosiddetti *skyrunner*. A tale acclimatazione contribuiscono anche un'attenta alimentazione, un'idratazione costante e un controllo della temperatura e dell'intensità dell'allenamento in quota nei giorni che precedono la competizione.

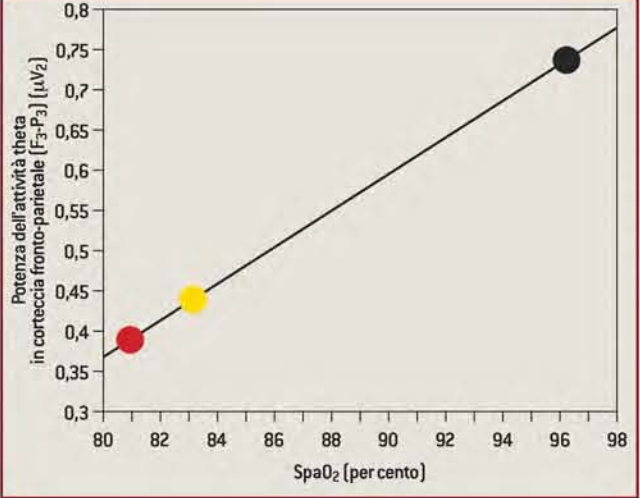
Complessivamente, le alterazioni dello stato di veglia che si osservano in altitudine, dopo esposizione acuta e cronica all'ipossia e al termine di una maratona in alta quota, sembrano essere riconducibili a un'alterazione, diretta o riflessa, sia dei sistemi catecolamminergici, sia dei sistemi, probabilmente GABAergici, del tronco encefalico (i primi connessi con la veglia, i secondi con il sonno).

LA MARATONA DISPUTATA A VARIE ALTITUDINI dimostra che il peggioramento percentuale della prestazione è sovrapponibile alla diminuzione della massima potenza aerobica in funzione dell'altitudine.

MIGLIORI PRESTAZIONI MONDIALI NELLA MARATONA

Anno	luogo	altitudine	tempo	velocità	%	vincitore
1999	Chicago	0	2:05:42	20,1	100	Khannouchi
1993	Mexico C.	2240	2:14:47	18,8	93	Ceron
1994	Tibet	4300	2:56:08	14,4	72	Carpenter
1995	Tibet	5200	3:22.25	12,5	62	Carpenter

Calo d'attenzione

Alcune funzioni cerebrali risultano temporaneamente peggiorate durante l'esposizione all'ipossia. Ciò è stato messo in relazione alla ridotta ossigenazione e alla riduzione del flusso ematico in alcune zone del cervello. In effetti, nonostante l'aumento della frequenza cardiaca, l'acclimatazione acuta e cronica riduce notevolmente la saturazione dell'emoglobina. Nel 1994 alcuni autori hanno osservato, in concomitanza con la diminuzione della saturazione periferica dell'ossigeno connessa all'altitudine, un certo calo di facoltà cognitive quali il tempo di reazione, la sensibilità a uno stimolo visivo, l'acuità visiva, l'attenzione, la stabilità posturale, la capacità di discriminazione, la memoria. Nel caso di una stimolazione luminosa la sensibilità si riduceva del 5 per cento a circa 1550 metri di quota e del 25 per cento a 3000 metri. A tale quota anche l'acuità visiva si abbassava del 30 per cento. A 6000 metri il tempo di reazione e la capacità di eseguire semplici azioni concatenate calava del 25 per cento.

Nei nostri studi abbiamo constatato una correlazione positiva tra la saturazione dell'emoglobina e la potenza dell'attività lenta (theta) nella corteccia fronto-temporo-parietale di sinistra. Oltre a ciò, si notavano variazioni topografiche sia delle attività lente sia di quelle rapide. Tali modificazioni indicano un deterioramento della vigilanza analizzabile e quantificabile attraverso apposite elaborazioni dei dati EEG, quali l'analisi dello spettro.

FREQUENZA CARDIACA E SATURAZIONE PERIFERICA ARTERIOSA DI OSSIGENO ($SpaO_2$) di cinque skyrunner misurate (*grafico a fronte*) nelle seguenti condizioni: a riposo a livello del mare (*in nero*), dopo esercizio a livello del mare (*in azzurro e in blu*), a riposo a 3680 metri (*in rosso*), a riposo a 4300 metri (*in giallo*) e dopo una maratona a 4300 metri (*in verde chiaro e scuro*). Il grafico qui sopra evidenzia la relazione tra attività EEG theta, tipica del sonno e dell'addormentamento, e saturazione arteriosa periferica dell'ossigeno registrate sugli stessi skyrunner: a riposo a livello del mare (*in nero*), dopo ipossia acuta a 3680 metri (*in rosso*) e dopo sei giorni trascorsi a 4300 metri (*in giallo*).

GLI AUTORI

IVANA GRITTI e MAURIZIO MARIOTTI sono docenti di fisiologia umana presso la Facoltà di medicina e chirurgia dell'Università di Milano; la Gritti è anche componente del Comitato scientifico della Federazione Sport Alta Quota e della Federation of Sport at Altitude. GIULIO SERGIO ROI è responsabile medico-scientifico della Federazione Sport Alta Quota e della Federation of Sport at Altitude. Alla ricerca descritta nell'articolo hanno collaborato, oltre al professor Mauro Mancia, Renato Calcaterra, Stefano Defendi, Marco Martignoni e Clara Mauri dell'Università di Milano.

L'esecuzione di test psicometrici, condotti sui soggetti che hanno partecipato ai nostri studi condotti in quota, ha confermato che le funzioni cognitive (del lobo frontale e temporale sinistro) erano temporaneamente peggiorate in altitudine. In particolare, Anna Pelamatti dell'Università di Trieste ha osservato che le prestazioni in compiti di memoria, attenzione e fluenza verbale risultavano peggiorate durante la fase di esposizione acuta all'ipossia, tendevano a stabilizzarsi con l'acclimatazione, e non cambiavano tra prima e dopo la maratona in quota.

L'introduzione di tecniche d'indagine sofisticate, quali la risonanza magnetica nucleare e la tomografia computerizzata, ha permesso di dimostrare danni cerebrali anche permanenti in alpinisti che hanno soggiornato per alcuni giorni a più di 7000 metri senza utilizzare le bombole di ossigeno.

Il mal di montagna

L'ipossia comporta alcune complicazioni di carattere medico comuni sia ai nativi e ai residenti in alta quota, sia ai soggetti che vi si recano occasionalmente. Nella maggioranza dei casi questi sintomi sono di lieve entità e si risolvono spontaneamente nel corso di alcune ore o di alcuni giorni, ma si possono anche verificare situazioni di maggiore gravità che mettono in serio pericolo la vita. Riassumiamo qui di seguito i quadri patologici che si possono riscontrare in chi si spinge a quote superiori ai 3000 metri. Il mal di montagna acuto è una patologia frequente e in genere benigna, caratterizzata da numerosi sintomi neurologici. Il più comune è la cefalea, presumibilmente legata a vasodilatazione cerebrale e accompagnata da inappetenza, nausea, vomito, diminuzione della prontezza mentale, insonnia, letargia, disturbi visivi con occasionali emorragie retiniche. In genere la sintomatologia si manifesta entro 12 ore dall'arrivo in alta quota, tende a permanere per 24-48 ore e poi scompare senza lasciare tracce particolari. La gravità dei sintomi è correlata alla velocità di raggiungimento dell'alta quota e all'impegno fisico ed è soggetta a una notevole variabilità individuale che non dipende, però, dal sesso o dall'età.

Per evitare i sintomi del mal di montagna acuto, gli alpinisti sono soliti effettuare le escursioni suddividendole in diverse tappe di alcuni giorni, in modo da acclimatarsi gradualmente alle diverse altitudini. I disturbi provocati dall'alta quota hanno probabilmente cause emodinamiche. In particolare, la vasodilatazione indotta dall'ipossia aumenta la pressione idrostatica all'interno dei capillari, favorendo la perdita di fluidi verso i tessuti. Il fenomeno, a livello dei capillari cerebrali, provocherebbe il limitato edema cerebrale responsabile dell'emicrania da mal di montagna.

Il mal di montagna si può manifestare anche attraverso l'edema polmonare, che rappresenta una forma assai grave e può colpire circa il 2 per cento dei soggetti esposti senza adeguata preparazione a quote superiori ai 3000 metri.

Ma la forma più pericolosa di mal di montagna si manifesta con edema cerebrale, che può portare a morte il paziente se non viene tempestivamente trattato. Questa patologia può simulare inizialmente un classico mal di montagna acuto che, in brevissimo tempo, acquista però le connotazioni dell'edema polmonare e poi dell'edema cerebrale. Questo evento colpisce circa l'1 per cento dei soggetti che si recano oltre i 2700 metri di quota. La sintomatologia dell'edema cerebrale comprende disturbi della visione, perdita della coordinazione neuromuscolare (atassia), emiparesi, stato confusionale, sonnolenza, fino a incoscienza, coma e morte. La patogenesi è quella classica dell'edema, con aumento della permeabilità dell'endotelio per opera di fattori meccanici o biochimici ancora non del tutto spiegati.

Il trattamento più efficace delle tre forme di mal di montagna sopra elencate consiste nel riportare rapidamente il paziente a quote più basse, unitamente alle terapie farmacologiche del caso. Quando è possibile, si consiglia l'impiego di camere iperbariche portatili monoposto.

BIBLIOGRAFIA

LUGARESI E. e PARMEGGIANI P.L. (a cura), *Regolazione somatica e vegetativa nel sonno. Aspetti fisiologici e clinici*, Pythagora Press, 1997.

GRITTI I. e altri, *Changes in Electroencephalographic Activity after a Marathon at an Altitude of 4,300 m*, in H. Schulz., P. L. Parmeggiani, M. Chase (a cura), *Sleep Research On line*, vol. 2, suppl. 1, pp.108, 1999.

BALDISSERA FAUSTO (a cura), *Fisiologia e biofisica medica*, Poletto Editore, Milano, 2000.

KRIGER M. K., ROTH T., DEMENT W. C. (a cura), *Principles and Practice of Sleep Medicine*, Saunders Company, 2000.

LUONI S. e altri, *Sleep at an Altitude of 3480 Meters*, in «Journal of Sleep Research», 20, Suppl. 1, 201, pp. 79, 2002.

I pescatori di HARAPPA

La civiltà che popolava, 5000 anni fa, la Valle dell'Indo era progredita per molti aspetti; un suo tratto distintivo era la pesca

di Dietrich Sahrhage

G. Helmes, Aachen

Un'imbarcazione di canne scivola silenziosa sul fiume. È mattino presto, e solo qualche uccello agita la vegetazione acquatica, disturbando la superficie liscia dell'acqua. Tenendo alto l'arpione, un pescatore segue con gli occhi un grande pesce gatto che nuota sul fondo di uno degli innumerevoli rami dell'Indo. Ha già catturato con la canna alcuni piccoli barbi, ma vorrebbe aggiungervi anche il grosso pesce. Lo sguardo fisso sulla preda, osserva con la coda dell'occhio un gruppo di pescatori poco lontani. Questi, lanciando una lunga rete dalla riva, sono riusciti a imprigionare un intero banco di pesci, e ora lo stanno trascinando a terra. Le prede sono numerose, e si dovrà pensare a conservarle. Questa scena avrebbe potuto svolgersi 5000 anni fa, quando una civiltà evoluta occupava la grande Valle dell'Indo, ai piedi della catena dell'Himalaya, e le zone circostanti. Gli archeologi la chiamano cultura di Harappa, dal nome della prima città della regione a essere stata scoperta. I resti archeologici attestano che quella cultura era assai avanzata, confrontabile per molti aspetti con le massime civiltà della stessa epoca: l'Antico Regno egizio e i regni mesopotamici. Gli archeologi ignorano quasi tutto sull'organizzazione sociale, le pratiche religiose e la scrittura di questa civiltà. Sanno però che la pesca e il commercio del pesce avevano un ruolo importante nella vita e nella cultura di Harappa.

Fonte di proteine, sovente rappresentato su oggetti comuni e sigilli, il pesce pare avesse un ruolo di rilievo nell'economia del bacino dell'Indo all'epoca di Harappa. La pesca veniva praticata anche in mare, catturando anche molluschi, e le conchiglie servivano da materia prima per l'artigianato. Il pesce pescato in mare veniva conservato con tecniche semplici ed efficaci, in uso ancora oggi, e trasportato a grandi distanze.

Il popolo di Harappa doveva essere pacifico, dato che gli scavi evidenziano ben poche tracce di conflitti. Le testimonianze della vita quotidiana rinvenute - ceramiche, utensili, gioielli, oggetti di uso comune, rilievi con banchetti - attestano una vita domestica e un'attività artigianale di grande raffinatezza. Le strutture dello Stato sono viceversa ben poco conosciute. Mentre gli Egizi e i Mesopotamici ci hanno lasciato sculture, bassorilievi e pitture murali, degli Harappani non rimangono che siti urbani relativamente modesti: resti di case in mattoni d'argilla che compongono ordinati impianti a scacchiera. Oltre ad Harappa, importanti città erano Mohenjo-Daro, in Pakistan, e Dholavira, nello Stato indiano del Gujarat. In tutti questi centri si rinvengono testimonianze dell'esistenza di uno Stato, ma le domande sono molte. Chi creò la perfezionata rete urbana di distribuzione dell'acqua? Chi organizzò l'approvvigionamento dei mercati? Si trattava dei membri di una casta superiore, nobiliare o religiosa? Lo ignoriamo, ma solo uno Stato autorevole poteva imporre un sistema di pesi e misure elaborato come quello harappano: in assenza di norme imposte dall'alto, perché gli artigiani avrebbero dovuto uniformare gli oggetti che producevano?

Anche la religione rimane un mistero. Gli archeologi non sono riusciti a identificare templi o luoghi di culto. Tuttavia parecchie scoperte fanno pensare che gli Harappani credessero in un aldilà. Per esempio, deponevano offerte funerarie accanto ai defunti; a quale scopo, se non per aiutarli nel loro viaggio nell'oltretomba? Sono anche state ritrovate figurine in forma di animali o di esseri umani e sigilli con rappresentazioni mitologiche, che fanno pensare anch'essi a una credenza nel soprannaturale.

L'alimentazione degli Harappani

Come si nutrivano gli Harappani? Si sa con certezza che gli abitanti della Valle dell'Indo praticavano l'agricoltura già alla fine dell'Età della pietra. Resti vegetali provano che venivano coltivati orzo e frumento; sulla tavola comparivano anche sesamo,

LASTRINA IN TERRACOTTA trovata a Mohenjo-Daro che rappresenta un'imbarcazione fluviale della cultura harappana. Le barche che oggi servono da abitazione ai nomadi che vivono sull'Indo sono assai simili.

lenticchie e uva. Il lino e il cotone venivano coltivati per le fibre, che mani abili tessevano o annodavano per farne vesti e reti da pesca. Senza dubbio, l'agricoltura harappana funzionava in modo analogo a quella egizia e mesopotamica.

Come il Nilo in Egitto e il Tigri e l'Eufrate in Mesopotamia, l'Indo trasporta enormi quantità di sedimento e ogni anno straripa nella stagione delle piogge. Le inondazioni possono essere disastrose, ma rendono fertile il suolo depositandovi limo. Le proteine animali della dieta harappana provenivano essenzialmente dall'allevamento, in quanto erano domesticati suini, bovini e ovini; senza dubbio venivano cacciati anche uccelli acquatici.

Tuttavia è l'importanza del pesce ciò che più colpisce nell'alimentazione harappana. Questa impressione è data in primo luogo dalla frequenza dei motivi decorativi ittici sugli oggetti d'uso e sui sigilli; ed è confermata dall'ampiezza del commercio harappano del pesce. Pesci, crostacei e molluschi rappresentavano una fonte alimentare importante per l'intera popolazione harappana. Una fonte apparentemente inesauribile, perché il sinuoso corso dell'Indo è bordato da una moltitudine di lanche, bracci morti e affluenti. Inoltre esso termina con un immenso delta che si affaccia sul pescosissimo Mare Arabico.

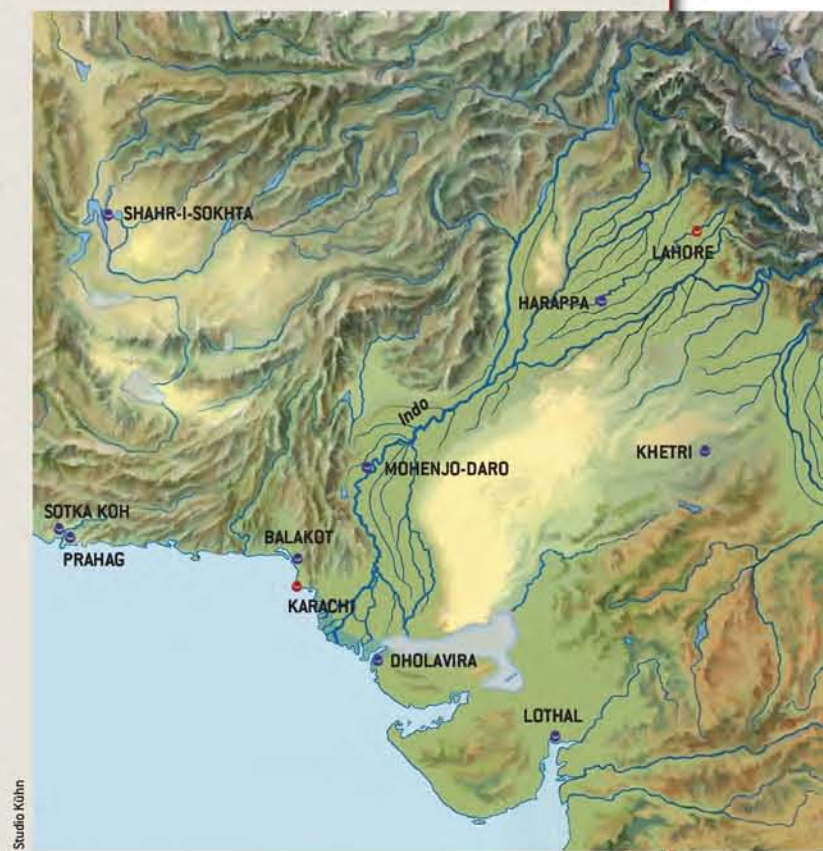
Sembra paradossale essere in grado di ricostruire in dettaglio le tecniche di pesca della civiltà di Harappa, e ignorarne del tutto l'organizzazione sociale e religiosa. In effetti sono state ritrovate numerose attrezzature per la cattura di pesci. In tutti i siti principali della civiltà di Harappa sono stati rinvenuti ami in rame, insieme con punte di frecce e di lance. Il rame proveniva, come hanno stabilito le analisi chimiche, dalla miniera di Khetri (oggi in India) a circa 400 chilometri a sud-est di Harappa, e dall'attuale Oman, chiamato nelle fonti mesopotamiche Magan. Le reti da pesca erano di uso comune: si sono ritrovati molti pesi in pietra, dello stesso tipo di quelli ancora utilizzati nella regione. I pesi venivano fissati alla parte bassa delle reti che, appese a galleggianti in legno o giunco, formavano un muro verticale nell'acqua. Reperti archeologici di reti e galleggianti non ve ne sono, così come non ve ne sono di nasse, sorta di panieri la cui apertura si restringe affinché i pesci, una volta entrati, non possano più uscirne; ma sulle ceramiche appaiono raffigurazioni di uomini che trasportano nasse.

In effetti le tecniche di pesca tradizionali ancora in uso nella Valle dell'Indo richiamano quelle harappane. Un amuleto in terracotta raffigura una barca a fondo piatto e con le estremità rialzate, dotata di due grandi governali a poppa e di una cabina o di una tenda eretta sul ponte. I

G. Helmes, Aachen

L'enigmatica cultura di Harappa

La cultura di Harappa trae il suo nome dalla città scoperta nel 1921 sulle sponde del Ravi, un affluente dell'Indo. Essa conobbe il proprio apogeo fra il 2600 e il 1900 a.C. Le sue tracce si estendono dal Belucistan (costa occidentale del Pakistan, vicino all'Iran) al Rajastan, in India, e dai monti dell'Himalaya fino alle coste del Mare Arabico. Sono stati finora scoperti oltre 1000 insediamenti harappani; questa cultura si estinse verso il 1700 a.C.

Per quale motivo? Lo si ignora, ma le ipotesi abbondano. La cultura di Harappa sarebbe sparita a seguito di una modificazione climatica o di una catastrofe ecologica, come la deforestazione o lo sfruttamento eccessivo dei pascoli. Recentemente Amos Nur della Stanford University ha chiamato in causa uno dei terremoti che sconvolgono regolarmente la regione. Nel gennaio del 2001 un violento sisma ha scosso tutta la parte meridionale dell'antica zona di influenza della cultura harappana, creando una lunga scarpata. Quello del 1819 provocò la formazione di un autentico «muro», lungo 100 chilometri e dell'altezza di 6 metri. Recentemente si è scoperto il letto di un antico fiume nel centro della regione di cultura harappana. Secondo Nur, una serie di terremoti lo avrebbe fatto sparire, sollevando talune zone ed erigendo dighe naturali. Così, il cuore della regione dominata dagli Harappani sarebbe stato trasformato in deserto, un po' come se il Nilo si fosse improvvisamente prosciugato subito dopo l'Antico Regno.

QUESTO SIGILLO DI PIETRA, scoperto nella città di Mohenjo-Daro, reca un segno onnipresente nella cultura di Harappa: il pittogramma di un pesce.

Cronologia delle culture indoeuropee

3000 a.C.

- **Valle dell'Indo**: insediamenti pre-harappani a Mehrgarh, Amri e Kalibangan.
- **Mesopotamia**: le città-stato sumeriche, come Eridu, Uruk, Ur e Lagash, costruiscono templi monumentali; compare la scrittura cuneiforme su tavolette d'argilla.
- **Egitto**: l'Alto e il Basso Egitto sono unificati in una singola entità culturale; Menes fonda la I Dinastia; sviluppo della scrittura e del calendario.
- **Asia Minore e Centrale**: fondazione di Troia I, un villaggio circondato da un muro di cinta, verso il 2920 a.C.
- **Iran e Golfo**: forse per influsso della cultura sumerica appare la scrittura proto-elamitica; domesticazione del cammello in Asia Centrale.

2800 a.C.

- **Mesopotamia**: durante il periodo di Gemdet-Nasr si sviluppa l'economia dei templi; produzione del bronzo.
- **Egitto**: l'architetto Imhotep costruisce la «piramide a gradini» di Zoser.
- **Europa settentrionale**: inizio della costruzione di Stonehenge.

2600 a.C.

- **Valle dell'Indo**: inizio dell'apogeo di Harappa, di Mohenjo-Daro e di altre città (fino al 1900 a.C. circa).
- **Mesopotamia**: tombe reali di Ur.
- **Egitto**: Antico Regno, con Menfi come capitale; sotto il regno di Cheope, costruzione della prima piramide di Giza.
- **Asia Minore**: fondazione del principato di Troia II e costruzione della sua capitale; risale a quest'epoca il «tesoro di Priamo».

2300 a.C.

- **Valle dell'Indo**: relazioni commerciali con la Mesopotamia e il paese di Magan (Oman).
- **Mesopotamia**: Sargon I fonda il regno di Akkad.
- **Egitto**: con la VI Dinastia le province godono di una indipendenza crescente; crollo dell'Antico Regno.
- **Asia Minore**: Troia si accresce e prospera.

1700 a.C.

- **Valle dell'Indo**: le ultime città vengono abbandonate dagli abitanti; fine della cultura di Harappa.
- **Mesopotamia**: a Babilonia, Hammurabi promulga il suo Codice; le sue truppe distruggono il palazzo di Mari (1759 a.C.).
- **Egitto**: caduta del Medio Regno e rapida successione di sovrani; a partire dal 1650 a.C., dominio straniero degli Hyksos, popolazione asiatica, sulla parte orientale del delta del Nilo.
- **Asia Minore**: ricostruzione di Troia, che diventa la grande cittadella di Troia VI.
- **Europa**: nella Grecia insulare e nel Mar Egeo emerge la potenza minoica.

Mohana, «nomadi del fiume», sono da alcuni considerati i discendenti diretti dei popoli della cultura di Harappa. Le barche abitabili che essi utilizzano somigliano a quella rappresentata su un amuleto di terracotta rinvenuto a Mohenjo-Daro. All'epoca in cui fioriva Harappa esistevano senza dubbio anche imbarcazioni di canne simili a quelle mesopotamiche; è possibile che esse non siano state inventate ad Harappa, ma importate dai bacini del Tigri e dell'Eufrate, grazie alle relazioni commerciali che dovevano esistere fra queste due regioni. Gli Harappani erano anche in grado di affrontare il mare: i modellini di barche in terracotta testimoniano che sapevano dotare le imbarcazioni di una chiglia, un albero e una vela per navigare in mare.

Quali specie ittiche erano oggetto di pesca? Oggi nelle acque interne del Pakistan vivono oltre 150 specie di pesci, la maggior parte dei quali affini alle carpe. I barbi asiatici, benché superino raramente i 15 centimetri di lunghezza, per la loro abbondanza costituivano certamente, allora come oggi, una risorsa importante. I barbi giganti, come il catla e il mahseer o anche il barbo tor (*Tor tor*), nonché i *Labeo*, come il rohu (*L. rohita*), che possono

QUESTE MIGLIAIA DI RESTI SCHELETRICI mescolati a frammenti di ceramica sono ciò che rimane di una immensa area per la lavorazione del pesce. Operai (o forse schiavi) harappani vi preparavano pesce conservato.

Jean Desse, Valbonne

raggiungere i 2 metri di lunghezza, erano certamente prede pregiate. Il siluro *Wallago attu* può arrivare alla medesima lunghezza e a 45 chilogrammi di peso.

In numerosi siti dell'entroterra sono stati portati in luce e studiati scheletri di pesci, o almeno le loro parti più massicce: la colonna vertebrale e il cranio. Tutte le analisi dimostrano che le faune acquatiche del bacino dell'Indo e della costa sono cambiate assai poco negli ultimi 5000 anni. Così, Nathalie Desse-Berset e Jean Desse, della missione archeologica francese nel Makran (antico nome del tratto di costa pakistana a est dell'Iran), hanno scoperto parecchi giacimenti di scheletri di pesce. Le decine, a volte centinaia, di migliaia di campioni testimoniano che il pesce salato era preparato a scala quasi industriale. Alcuni giacimenti risalgono a epoca anteriore al periodo harappano, a dimostrazione del fatto che le tecniche di conservazione del pesce erano già note nella regione. Tuttavia parecchie scoperte dimostrano che le tecniche di salagione vennero impiegate intensivamente per tutto il periodo harappano (e lo sono ancora oggi). Così, il giacimento di Prahag è stato preservato da alte dune, che lo hanno ricoperto e ne hanno probabilmente causato l'abbandono. Gli archeologi francesi lo hanno scoperto dopo che le dune si erano spostate. Una superficie di 120 metri per 15 era interamente dedicata alla lavorazione del pesce. Decine di migliaia di scheletri di pesce, migliaia di otoliti (concrezione calcarea dell'orecchio interno dei pesci che assicura l'equilibrio) e abbondanti quantità di conchiglie marine erano associate a frammenti di ceramica harappana e a qualche resto di strumenti di bronzo. La sabbia aveva non solo conservato i reperti, ma li aveva addirittura fissati nelle loro posizioni per 50 secoli.

Esaminando questi resti, gli archeologi hanno potuto identificare le specie pescate e la loro taglia. Hanno anche studiato gli otoliti, i cui anelli di crescita, analogamente a quelli degli alberi, permettono di valutare l'età del pesce. Si è così visto che tutti gli animali pescati appartenevano a specie esclusivamente costiere: grandi e piccoli scienidi (sorta di ombrine), *Arius thalassinus*, piccoli squali che vivono presso le coste. Si tratta in ogni caso di pesci che potevano essere catturati da riva senza metodi sofisticati. Ciò che è notevole è il ritrovamento di resti di questi animali - tuttora pescati con le reti dai pescatori del Belucistan (regione costiera occidentale del Pakistan) - nell'entroterra, in gran quantità presso la città di Miri Qalat, 120 chilometri a nord di Prahag, ma anche nella stessa Harappa, a 900 chilometri dalla costa. Si trasportava dunque il pesce su grandi distanze: cosa impossibile se la popolazione harappana non fosse stata maestra delle tecniche di conservazione.

I pescatori tagliavano la testa dei pesci, li dividevano in due nel senso della lunghezza e ponevano i mezzi pesci in pozzi artificiali scavati nel suolo e riempiti di salamoia; ve li lasciavano per due-tre giorni, dopo di che il pesce veniva messo a seccare al sole per una settimana o più.

Nella ricostruzione delle tecniche utilizzate gli archeologi sono stati aiutati dal fatto che molte di esse sono ancora in uso. William Belcher, condirettore del progetto HARP (Harappa Archaeological Research Project), si è stabilito per tre anni in un villaggio della regione di Karachi per studiarvi le tecniche tradizionali di pesca. Egli ha constatato in particolare che, per conservare i grossi pesci destinati alla vendita, si utilizza lo stesso tipo di pozzo riempito di salamoia già impiegato dai pescatori harappani.

IN SINTESI

- Fra il 2600 a.C. e il 1900 a.C. fiorì nella Valle dell'Indo la civiltà di Harappa, della quale restano purtroppo solo siti urbani relativamente modesti.
- La cultura harappana non può tuttavia essere considerata «minore»: i ritrovamenti archeologici relativi alle pratiche di pesca, di conservazione del pesce, del suo trasporto per centinaia di chilometri, e ai sistemi di peso e misura standardizzati testimoniano l'esistenza di una significativa struttura statale.
- Gran parte delle informazioni su questa civiltà deriva proprio dallo studio delle tecniche di pesca, conservazione e commercio del pesce.
- La civiltà di Harappa aveva sviluppato anche fiorenti commerci per via marittima con molte città mesopotamiche.

Conchiglie e artigianato

Oltre ai pesci, i fiumi, i laghi e l'oceano fornivano agli Harappani importanti risorse sotto forma di crostacei e di molluschi. Questi prodotti della pesca servivano non solo come fonte di cibo, ma anche come materia prima per gli artigiani. Nella Valle dell'Indo le conchiglie furono utilizzate molto precocemente (verso il 7000 a.C.) per la realizzazione di ornamenti e di oggetti d'uso. Numerosissime botteghe producevano questi oggetti con tecniche e stili identici, e a questo scopo impiegavano soprattutto chiocciole di mare trasportate dalla costa verso l'entroterra.

I gusci di questi molluschi servivano a produrre bracciali, anelli e perle che venivano scambiati, nelle regioni dell'interno (fino agli attuali Iran e Afghanistan), in cambio di oro, stagno e pietre semipreziose, come il lapislazzuli. Gli artigiani si servivano anche della conchiglia del murice (il mollusco da cui, nell'antichità, si ricavava la porpora) per realizzare cucchiai che si ritrovano sovente nelle tombe. Forse i sacerdoti harappani li usavano per versare nella tomba un qualche liquido consacrato, prima di depositare il cucchiaio nella fossa.

Gli artigiani harappani utilizzavano anche strombi, la cui conchiglia ha un bell'aspetto simile a porcellana, per confezionare recipienti, pedine da gioco o elementi di intarsi. I gusci a spirale delle chiocciole di mare o delle conche presentano un asse centrale, la columella, che veniva prelevato con seghe e punteruoli di bronzo e poi esportato. In effetti queste strutture cilindriche, trasformate in sigilli, sono state ritrovate in Oman e in Mesopotamia. Se ne è concluso che vi fossero state portate per mare, cosa che prova l'esistenza di scambi commerciali fra la Valle dell'Indo e la Mesopotamia.

Esistono altre testimonianze dei commerci harappani. A Lothal, un'antica città dell'attuale India, presso il Golfo di Cambay, sono state portate alla luce botteghe dove si lavoravano conchiglie a spirale, rame e ceramica. Accanto a queste botteghe, vi è un bacino con un muro di mattoni di argilla cotta, avente una superficie di 214 metri per 36; da un lato vi è una sorta di canale che poteva fungere da passaggio per imbarcazioni e dall'altro una botola per l'evacuazione dell'acqua. Il bacino, il muro e un «magazzino» di dimensioni abbastanza grandi sono i resti di quella che sembra essere stata un'installazione portuale. Questa interpretazione è sorretta dalla scoperta di gusci di molluschi marini sul fondo del bacino. Lothal era forse uno dei porti dove si imbarcavano i mercanti harappani per dirigersi in Mesopotamia.

Il commercio fra i bacini dell'Indo e dell'Eufrate è anche ricordato in testi mesopotamici, nei quali la zona dell'Indo è chiamata «Meluhha». Un testo cuneiforme su una tavoletta d'argilla indica in particolare che re Sargon I (2300 a.C. circa) aveva decretato che le navi di Meluhha avessero il diritto di trasportare il loro carico fino ad Akkad, la capitale. Fra le merci importate sono citati rame, oro, lapislazzuli, legno e oggetti in conchiglia di chiocciola di mare. Sargon I è anche rappresentato su un sigillo cilindrico in compagnia di un interprete di Meluhha. Inoltre, molte delle iscrizioni che Gudea, signore di Lagash in Sumer, fece apporre nel tempio cittadino, circa 200 anni dopo Sargon I, indicano che materiali preziosi erano stati importati da Meluhha per ornare l'edificio religioso.

Quali erano le merci che i mercanti harappani riportavano in patria? Alcune tavolette citano cereali, olio, lana, tessuti, barre d'argento, e forse anche blocchi di farina di pesce. Le relazioni commerciali fra la Valle dell'Indo e la Mesopotamia si interruppero alla caduta del regno di Akkad, verso il 2125 a.C. In seguito, il commercio passò attraverso scali intermedi, come quelli di Dilmun sull'isola di Bahrein, e di Magan (Oman). È possibile che sia perdurato fin verso il 1700 a.C., allorché la cultura di Harappa scomparve, per ragioni ancora sconosciute.

Pesci: T. Gloefelt, P.J. Kailola/J. Jensen

G. Helmes, Aachen

I PESCATORI DELL'INDO, come facevano i loro antenati, tendono le reti per mezzo di una grossa corda di giunco che galleggia al pelo dell'acqua. Il crescente inquinamento del fiume potrebbe far sparire il loro modo di vita tradizionale. Alcuni dei pesci gatto che sono loro preda (*qui sopra, Wallago attu*) arrivano a 2 metri di lunghezza. Il siluro (*al centro, Arius thalassinus*) e il «pesce grugnitore» (*in alto, Pomadasys hasta*) erano consumati anche dai popoli della cultura di Harappa.

L'AUTORE

DIETRICH SAHRHAGE ha diretto dal 1974 al 1988 l'Istituto di ricerca per la pesca marina del Governo tedesco.

BIBLIOGRAFIA

JANSEN MICHAEL, *Die Indus Zivilisation. Wiederentdeckung einer frühen Hochkultur*, Dumont, Colonia, 1986.

DESSE JEAN e BESENVAL ROLAND, *En rond ou en long? Aire de découpes de poisson du littoral balouche (Makran pakistanais)*, in «Anthropozoologica», 21, p. 163, 1995.

DESSE JEAN e DESSE-BERSET NATHALIE, *Salaisons de poissons marins aux marges orientales du monde gréco-romain. Contribution de l'archéozoologie*, in MEFRA-112, 2000-1, pp. 119-134, 2000.

IL DEC PDP-11 fu uno dei computer più famosi degli anni settanta. Evoluzione del PDP-8, rappresentò una delle tappe che portarono i computer, dai laboratori scientifici e militari, nelle nostre case. Nella foto Michael J. Muuss (*a sinistra*) e Earl Weaver (*a destra*) alle prese con il PDP-11 durante lo sviluppo del tank XM-1.

Foto US Army, cortesia Michael J. Muuss

Grandi calcolatori e piccoli «giocattoli» ebbero uno sviluppo parallelo e, tra gli anni cinquanta e gli anni ottanta, contribuirono per vie diverse alla nascita degli attuali personal computer

MACCHINE PENSANTI crescono

di Massimo Zaninelli

La predizione, si sa, è arte difficile, soprattutto quando si parla di informatica. Ne sa qualcosa Thomas Watson senior, presidente «storico» di IBM, che nel 1943 sentenziò gravemente: «Credo che al mondo ci sia mercato forse per cinque computer». La battuta rende l'idea di come, ai suoi albori, il computer sembrasse destinato a impieghi esclusivamente pubblici - civili o militari - e solo per le nazioni più ricche e potenti... quattro o cinque appunto. Va anche ricordato che i calcolatori allora disponibili incoraggiavano valutazioni prudenziali: l'Harvard Mark 1, completato proprio in quell'anno, costava 500.000 dollari dell'epoca, era lungo più di 15 metri, pesava oltre 5 tonnellate e, ricorda un testimone, produceva un suono «come di una sala di signore che sferruzzano».

Occorreva davvero molta lungimiranza per immaginare che i nipotini di un simile mostro potessero entrare nelle nostre case. Eppure, già nel novembre del 1949 (circa tre anni dopo la nascita di ENIAC, primo vero computer) Edmund C. Berkeley pubblicava *Giant Brains, or Machines That Think*: «Considereremo ora come sia possibile disegnare una semplice macchina che pensa... La chiameremo Simon, in onore del suo predecessore Simple Simon... Simon è così semplice e piccolo che potrebbe occupare meno spazio di una cassetta di frutta; [...] ha la stessa utilità di una scatola del piccolo chimico: stimolare il pensiero e la comprensione, produrre formazione e abilità». Simon nasceva dallo sforzo congiunto di un abile meccanico, William A. Porter, e di due studenti di ingegneria elettrica della Columbia University, Robert A. Jensen e Andrew Vall; funzionava mediante relè, adottava una curiosa numerazione a base quattro (0, 1, 2, 3), poteva addizionare, negare, fare «maggiore di», selezionare e costava meno di 600 dollari, tutto compreso. «Innanzi tutto Simon può crescere» affermava Berkeley parlando del futuro. «Con un altro chassis, una progettazione e un cablaggio adeguati, la macchina potrà calcolare col sistema decimale. Forse in sei mesi potremo farlo lavorare su problemi reali. In secondo luogo, potrebbe dar vita alla moda di costruire mini-cervelli elettronici, come accadde negli anni venti con la radio a cristalli di galena.»

WE DON'T NEED ENGINEERS

. . . but they write to us daily to order our GENIAC Electric Brain Construction Kits.

So do TEACHERS, SCIENTIFIC AMATEURS, INDUSTRIAL FIRMS and schools. (See list below.)

THOUSANDS OF SATISFIED CUSTOMERS have bought GENIACS on a 7 DAY REFUND guarantee

We are proud to offer our 1957 Model, with up to the minute improvements for the thousands of new customers who can use them.

WHAT IS A GENIAC?

Here is a picture of the 1957 Model GENIAC in the display rack ($8.00 separately) which comes with every kit. GENIAC stands for Genius Semi-Automatic Computer. A kit of specially designed switch decks and racks which permit the user to construct more than thirty different machines (following directions and wiring diagrams) and as many more as he is able to design himself. These machines demonstrate the applications of electric circuitry.

APPLICATIONS OF GENIAC

SIMPLE COMPUTER CIRCUITS for binary, decimal adding, subtracting, dividing, multiplying machines, PROBLEMS in symbolic logic, reasoning, comparing, PSYCHOLOGICAL TESTING and EXPERIMENT GAME PLAYING CIRCUITS for tit-tat-toe and nim. ACTUARIAL ANALYSIS.

SOME OF OUR CUSTOMERS

Allis-Chalmers • Remington-Rand • International Business Machines • Manuel Missionary College • Barnard College • Westinghouse Electric • Phillips Laboratories • General Insurance Co. of America • Lafayette Radio • Rohr Aircraft Co. • Albert Einstein Medical College • Naval Research Laboratories • Board of Education, Tecumseh, Nebraska • Los Angeles Public Schools • Jefferson Union High School • Oklahoma A & M • Courtland Jr. High School • Bell Telephone Laboratories.

WHAT COMES WITH THE KIT?

BOOKS–1. SIMPLE ELECTRIC BRAINS, AND HOW TO MAKE THEM . . . 64 page experiment manual.–NEW! 2. MINDS AND MACHINES . . . 200 page text on computers, automation and cybernetics.–NEW! 3. WIRING DIAGRAMS for basic GENIAC circuits.–NEW! 4. Beginners Manual for the person who has little or no familiarity with electric circuits.–NEW! 5. GENIAC study guide . . . the equivalent of a full course in computer fundamentals, lists additional readings.

PARTS–PANELS, DISCS, RACK (for easy assembly and display). Hardware, wire, tools, battery, holder etc. for more than thirty machines.

SEND for your GENIAC now. At only $19.95, a bargain, comes complete with over 400 parts and components, 5 books and manuals. We guarantee that if you do not want to keep GENIAC after one week you can return it for full refund.

Add 80c west of Miss. $2 outside U.S. Mail Name & Address with check or Money Order to

OLIVER GARFIELD CO., DEPT. PS-107A 126 LEXINGTON AVE. NEW YORK 16, N.Y.

Popular Science - OCTOBER 1957 51

«NON SERVONO GLI INGEGNERI» recita la pubblicità di Geniac (*in alto a sinistra*) uno dei computer educazionali di Berkeley. Poi, dall'alto in basso, Heathkit EC-1, DEC PDP-8 e Kenbak-1 illustrano lo sviluppo parallelo dei computer «fai-da-te» e dei prodotti della nascente industria informatica americana. L'Olivetti 101 (*a sinistra*) mostrò il potenziale della tecnologia italiana, senza però produrre gli sviluppi sperati.

Un'occasione mancata

Due profezie azzeccate: nel 1955 Berkeley lanciò Geniac (Genius Almost-Automatic Computer), un piccolo calcolatore digitale programmabile basato su dischi rotanti di masonite e rame: costo totale 19,95 dollari. Seguirono a breve altre macchine: Tyniac, Weeniac e Brainiac, ciascuna delle quali contribuì a trasformare i piccoli calcolatori giocattolo in un mini-fenomeno di tendenza, proprio come aveva sperato Berkeley.

E il fenomeno trovò altri attori: benché la «stagione analogica» delle macchine da calcolo sembrasse definitivamente tramontata, nel 1959 venne lanciato Heathkit EC1, un «Computer didattico analogico» che, grazie a nove «amplificatori operazionali a corrente continua», poteva svolgere calcoli matematici i cui risultati erano leggibili su un apposito indicatore a lancetta. Insomma, assomigliava all'antenato di un PC ma, per architettura logica, era più simile a un regolo da taschino.

Ma si trattava di un canto del cigno: anche nel variopinto mondo delle «macchine che pensano» a prezzi popolari l'avvento del digitale era inarrestabile, come dimostra il piccolo Minivac 601 (1961), una versione miniaturizzata dei grandi «calcolosauri» di prima generazione che riusciva con i suoi sei relè a svolgere operazioni di media complessità per meno di 200 dollari.

Va comunque ricordato che queste prime «macchine» - e molti loro discendenti - erano giochi didattici sperimentali pubblicizzati su testate come «Popular Electronics» e dedicati ad appassionati «smanettoni» che fino al giorno prima si erano dilettati con l'elettronica «fai da te».

Con l'eccezione di Altair, queste macchine da calcolo non erano in grado di svolgere alcun lavoro utile ed erano del tutto prive di periferiche o di un qualunque software: anche le operazioni più elementari andavano scritte da zero, in codice macchina, dal volonteroso utente.

In parallelo al filone amatoriale iniziava però a delinearsi un'altra via di sviluppo: diversi giovani progettisti intravvedevano nella miniaturizzazione dei computer una straordinaria occasione per concentrare in piccoli spazi una potenza di calcolo senza precedenti. L'idea di «una macchina nella quale non venisse solamente privilegiata l'autonomia o la potenza ma anche l'autonomia funzionale» prendeva corpo nellae mente di un giovane ingegnere italiano appena assunto da Olivetti, Piergiorgio Perotto. Caso volle che Perotto maturasse questo pensiero verso la fine del 1962, proprio all'indomani della scomparsa del leader carismatico dell'azienda, Adriano Olivetti. La crisi che ne seguì e la tradizionale vocazione meccanica dell'azienda fecero sì che il progetto di Perotto e dei suoi collaboratori non venisse valorizzato a dovere. Eppure la Programma 101 era una macchina davvero innovativa: «Per l'ingresso e l'uscita dei dati, pensai a una cartolina magnetica [...] l'antesignana degli attuali dischetti o floppy-disk». La memoria dinamica venne realizzata con la «linea magnetostrittiva, un dispositivo nel quale la memoria si conservava dinamicamente circolando lungo [...] un filo di acciaio per molle». L'ottima accoglienza che la stampa internazionale riservò alla Programma 101 e il suo successo commerciale non bastarono a imprimere all'Olivetti una «svolta elettronica». La Programma 101 fu vista come prodotto di élite e l'azienda, non sostenendone adeguatamente lo sviluppo, perse in larga parte una buona opportunità. Perfino Hewlett Packard si ispirò alla macchina di Ivrea per il suo HP 9100, pagando senza fiatare 900.000 dollari dell'epoca in royalties alla società italiana.

Sia i prodotti Olivetti sia quelli HP (come anche gli IBM degli anni settanta) erano pensati soprattutto per l'ambiente scientifico: ideali per calcoli tecnici e statistici, non erano neppure in grado di scrivere una frase di intestazione in cima a un documento. E il costo li rendeva ben poco «personal».

Tuttavia queste esperienze furono le prime manifestazioni della crescente attenzione che le imprese cominciavano a rivolgere ai piccoli computer: la Honeywell tentò di lanciare il Kitchen Computer, che associava un elaboratore di tutto rispetto a un tagliere da cucina (!), con risultati tanto modesti quanto prevedibili... Assai più importante, nel 1965 la Digital Equipment Corporation, fondata nel 1957 da Kenneth Olsen e Harlan Anderson (si veda M. M. Waldrop, *Le origini del personal computer* in «Le Scienze» n. 404, aprile 2002) lanciò il PDP-8, una specie di «Modello T» dei computer, le cui molte evoluzioni furono vendute fino al 1990. Il PDP-8 fu la prima macchina ad adottare la *small scale integration* (SSI), la tecnologia di integrazione dei transistor destinata a evolvere in forme sempre più spinte, grazie a cui quasi ogni componente elettronico divenne ben presto disponibile in forma standardizzata e con prestazioni che, secondo la legge di Moore, sarebbero raddoppiate ogni 12-18 mesi.

La svolta dell'integrazione

Fu proprio l'integrazione a dare ufficialmente inizio alla rivoluzione informatica: nel 1968 Bob Noyce lasciava la Fairchild e fondava, con Gordon Moore (sì, proprio quello della «legge») e Andrew S. Grove, la Intel che, di lì a due anni, avrebbe realizzato il primo microprocessore. Nel 1972 Intel lanciò anche il SIM 4, il primo microcomputer, ma solo come esperimento, poi abbandonato per concentrarsi sul mercato della componentistica anziché su quello dei prodotti finiti.

Ormai la tecnologia offriva la possibilità di realizzare idee nuove e originali: nel 1970 Alan Kay, che all'epoca collaborava con il centro di ricerca Xerox di Palo Alto, abbozzò l'idea di un computer dal

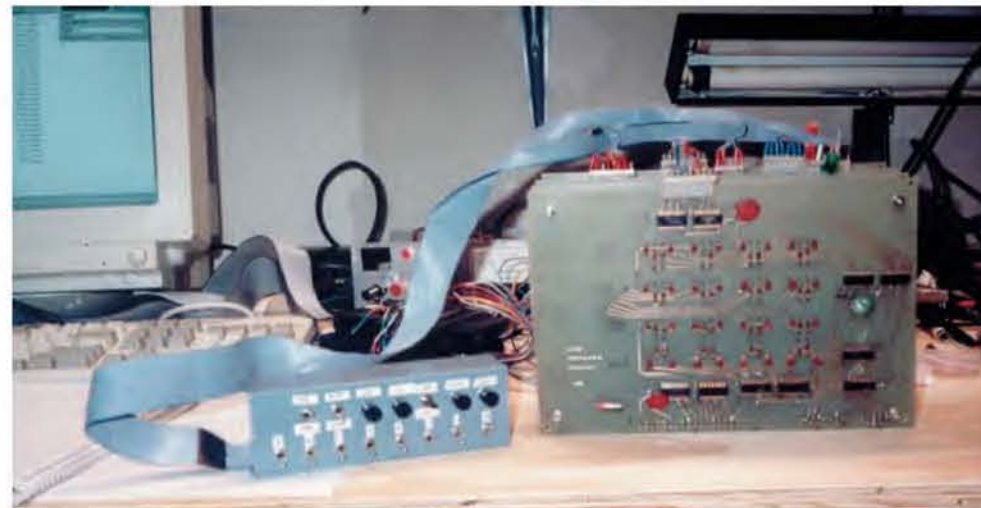
IN SINTESI

■ I primi tentativi di creare qualcosa di analogo a un personal computer risalgono addirittura agli anni cinquanta. Si trattava comunque di esperimenti didattici, sostanzialmente inadatti a svolgere alcun lavoro utile, privi com'erano di periferiche e di software di alto livello: anche le operazioni più elementari andavano scritte in codice macchina.

■ Pochi sanno che un passo importante fu rappresentato da «Programma 101» della Olivetti, che però non ne colse le implicazioni, cedendo i brevetti alla HP.

■ L'altro fattore decisivo per lo sviluppo dei personal è stato l'avvento della tecnologia di integrazione dei transistor, che ha consentito al contempo un drastico ridimensionamento dei costi e un forte aumento delle prestazioni.

http://www.computerhistory.org/
Sito del Computer Museum History Center Web

D'interesse anche i siti
http://www.islandnet.com/~kpolsson/comphist/
http://www.blinkenlights.com/pc.shtml
http://www.silab.it/frox/p101/

IL MARK-8, venduto in piani di montaggio a 5 dollari, presentava spesso assemblaggi «disinvolti». L'esatto opposto dell'ordinatissimo HP 9830 (*sopra*).

L'AUTORE

MASSIMO ZANINELLI, laureato in storia contemporanea presso l'Università degli Studi di Milano, ha pubblicato su «Le Scienze» numerosi articoli brevi di storia della scienza, diversi dei quali dedicati alla storia dell'informatica. Sempre su «Le Scienze» ha pubblicato insieme con Silvio Hénin *Il calcolo automatico negli Stati Uniti, dal 1850 al 1950*. In passato ha collaborato con quotidiani e periodici e attualmente svolge attività di comunicazione interna presso IVECO S.p.A.

GALLERIA DELLE CELEBRITÀ

Produttore	Modello	Lancio	Prezzo ($)	CPU	Tecnologia	Memoria
Berkeley Enterprises	Simon	1950	300		relè	
Berkeley Enterprises	Geniac	1955	19,95	interruttori elettrici rotanti		
Heathkit	EC-1	1959	199	amplificatori operazionali (analogico)		
SDC	Minivac 601	1961	135		relè	
Olivetti	Programma 101	1965	3.200			linee magnetostrittive
DEC	PDP-8	1965	7.390 18.500	SSI		nuclei di ferrite
Honeywell	Kitchen Computer	1966	7.000	SSI		nuclei di ferrite
Alcosser, Phillips e Wolk	Paperclip Computer	1967	3,75 + componenti		graffette, barattoli di alluminio, lame, interruttori	
Hewlett Packard	HP 9100	1968	4.900			nuclei di ferrite
Imlac	PDS-1	1970	?	SSI		nuclei di ferrite
Kenbak	Kenbak-1	1971	750	MSI		
Hewlett Packard	HP 9830	1972	5975	MSI		
Intel	SIM4	1972	?	processore 4004 - LSI		
Micral	Micral	1973	1.750	processore 8008 – LSI		
Xerox	Alto	1973	16.000 32.000	MSI		
Hewlett Packard	HP 65	1973	795	LSI		
SCELBI	8H	1973	565	processore 8008 – LSI		
Radio Electronics	Mark-8	1974	5 per il progetto	processore 8008 – LSI		
MITS	Altair 8800	1975	439 in kit, 621 assemblato	processore 8008 – LSI		
IBM	5100	1975	Tra 9.000 e 20.000	LSI		
Apple	Apple 1	1976	666	processore 6502 – LSI		
Apple	Apple][	1977	1.295	processore 6502 – LSI		
IBM	5150 PC	1981	?	processore 8088 – VLSI		

nome singolare e dal dichiarato scopo pedagogico: KiddiKomp. Nella sua ipotesi, la macchina doveva essere dotata di un piccolo schermo (14 x 14 pollici), di una tastiera separabile e di un mouse: molto simile alla configurazione del PC che tutti conosciamo. Quasi in parallelo, Kay sviluppò un sistema di programmazione basato su «cellule» che scambiano messaggi: ciascun messaggio contiene i dati, l'indirizzo del mittente, quello del destinatario e le operazioni che il destinatario deve effettuare con i dati. Il linguaggio fu denominato Smalltalk e rappresenta il nocciolo di ciò che Kay definì *object orientation*, a tutt'oggi tecnologia tra le più diffuse per lo sviluppo software.

Tutto è pronto

Ormai tutti gli ingredienti per l'informatica di massa erano disponibili e il mercato dei computer «personali» ebbe uno straordinario impulso. Fu l'ultimo momento di gloria dei costruttori amatoriali: dal bizzarro Paperclip Computer, realizzato con componenti di fortuna, tra cui graffette e barattoli di latta, al poco noto Imlac PDS-1, il primo dotato di interfaccia grafica, fino al Kenbak-1, progettato da John Blankenbaker e commercializzato attraverso «Scientific American» (!) alla modica cifra di 750 dollari. E ancora, lo SCELBI-8H (SCientific, ELectronic and BIological) e il Radio Electronics Mark-8 i cui piani di costruzione venivano venduti a 5 dollari. Ultima appartenente alla categoria dei piccoli calcolatori a impiego esclusivamente scientifico fu la HP 65 (1973) cui toccò la ventura di essere imbarcata come computer di «scorta» a bordo di alcune missioni Apollo. In Europa, François Gernelle progettò per la francese Micral un microcomputer che ottenne un buon successo senza però cogliere appieno «l'occasione di fondare una *start-up* monumentale».

Nel frattempo, i grandi costruttori americani, consapevoli che l'informatica si avviava a diventare un fenomeno di massa, erano decisi a conquistare il nuovo business: Hewlett Packard e Xerox lanciarono nuove macchine a ripetizione proprio mentre si verificava il miglior tentativo di tenere in vita l'informatica *do it yourself* a costi contenuti: il «celebre» Altair 8800, prodotto da Micro Instrumentation in quantitativi relativamente elevati, fu il primo a impiegare software Microsoft (un *basic* scritto da Paul Allen e Bill Gates) ma anche l'ultimo a essere venduto sia in kit sia montato. Altair, costruito intorno a un processore Intel 8080, era in grado di collegarsi a periferiche quali monitor e unità di memoria esterne, potendo così svolgere piccoli compiti pratici; ciò contribuì in modo concreto al successo dei microcomputer e al loro passaggio definitivo dalla dimensione hobbistica a quella professionale.

Apple e IBM stavano ormai per imprimere un nuovo corso al futuro del PC, sia pure con scelte tecnologiche e commerciali diverse. Apple 1 (1976), primo prodotto della società fondata da Steve Jobs a Steve Wozniak, la fece finita con interruttori e lucette, così comuni in quegli anni, mentre il più potente Apple][(1977) fu, anche grazie a una politica di prezzi contenuti, il «primo PC» di massa. La sua fama dipende soprattutto dal fatto che fu il primo a essere veramente utilizzabile, completo com'era di unità di input (tastiera), output grafico (video), unità di memoria di massa (floppy), e soprattutto di software facile! Insomma, quasi la realizzazione fedele del progetto di Kay.

In parallelo, la serie 5100 di IBM (1975-81) sviluppò un progressivo incremento delle prestazioni pur con costi ancora molto elevati. Toccò al suo ultimo discendente, l'IBM 5150 (1981), di assumere per primo la definizione ufficiale «PC» (coniata nel 1974 dalla rivista «Rolling Stone») e di avviare definitivamente lo spettacolare sviluppo dell'informatica nel lavoro e nella vita quotidiana.

Da allora sono passati vent'anni e i personal computer sono diventati sempre più compatti, potenti e numerosi, cambiando in modo radicale le nostre vite. Il dato più recente pubblicato dal sito How many (febbraio 2002, http://www.nua.ie/surveys/how_many_online/index.html) parla di 544,2 milioni di computer connessi in rete nel mondo (di cui oltre 171 milioni in Europa e oltre 19 milioni in Italia) senza contare un buon numero di «ferri vecchi» non idonei al web, e tutto lascia pensare che siamo solo al primo atto di una evoluzione tanto imponente quanto imprevedibile: non solo il pessimista Watson, ma nemmeno l'intraprendente Berkeley avrebbero mai immaginato tanto.

BIBLIOGRAFIA

GOLDSTINE HERMAN H., *The Computer. From Pascal to von Neumann*, Princeton University Press, 1993.

SHASHA DENNIS e LACERE CATHY, *Out of Their Minds*, Copernicus, 1995.

PEROTTO PIERGIORGIO, *Programma 101*, Sperling & Kupfer, 1995.

KURZWEIL RAY, *The Age of Spiritual Machines*, Penguin Books, 1999.

GENOCIDIO SU BASE SESSUALE: il batterio *Wolbachia* elimina i maschi della farfalla *Acraea encedon*, perché solo le femmine possono ospitare il parassita e trasmetterlo alle generazioni successive.

Francis M. Jiggins

di Laurence D. Hurst e James P. Randerson

Manipolatori occulti del SESSO

Controllando la vita sessuale delle sue vittime, il batterio parassita *Wolbachia* potrebbe contribuire a far nascere nuove specie

Non mordere la mano che ti dà il pane. Il vecchio adagio si adatta bene al comportamento di molti parassiti nei confronti delle loro vittime. Uno sfruttatore che può diffondersi solo quando il suo ospite si riproduce non deve essere eccessivamente pericoloso, perché un danno troppo grave al suo ignaro benefattore pregiudicherebbe le probabilità riproduttive dello stesso parassita. Questo modello è in contrasto con la tattica di un agente patogeno il cui tempo di contagio è breve, come il virus dell'influenza. Esso infatti non ha interesse a mantenere in vita a lungo il proprio ospite, e in questo caso viene favorita una strategia di trasmissione rapida, incurante dei costi per l'ospite. Il batterio *Wolbachia*, parente stretto di *Escherichia coli*, ha un'ampia distribuzione e soggiorna a lungo nell'invertebrato che lo ospita. Alloggia all'interno delle cellule e viene trasmesso alla generazione successiva attraverso le uova. Tuttavia, al contrario di quanto ci si può aspettare, il batterio opera sull'ospite diverse manipolazioni, tra cui l'uccisione della prole maschile, la trasformazione dei maschi in femmine e la sterilità di alcuni accoppiamenti. Ma se la riproduzione di *Wolbachia* è così strettamente legata a quella dell'ospite, perché tanto scompiglio?

La risposta è che il batterio non viene trasmesso attraverso lo sperma, ma solo con le uova, e quindi l'interesse riproduttivo del parassita risiede negli ospiti di sesso femminile. Per il batterio i maschi, in quanto inadatti a veicolarlo, rappresentano una sorta di prigione evolutiva.

Nel corso del tempo, tuttavia, la selezione naturale è riuscita a modificare la situazione degli ospiti di sesso maschile: anziché essere un vicolo cieco, il problema della non trasmissibilità si è trasformato in un'opportunità. In questa vicenda evolutiva *Wolbachia* può aver avuto un ruolo molto più importante di quello di semplice comparsa, perché, alla lunga, le sue manipolazioni dimostrano di produrre effetti profondi sull'ospite. Interferendo nella riproduzione

di quest'ultimo, *Wolbachia* getta le basi per la nascita di nuove specie.

Wolbachia è piuttosto comune ed è poco esigente nella scelta dell'insetto o dell'invertebrato da parassitare. Quando John H. Werren e colleghi dell'Università di Rochester hanno esaminato numerosi insetti neotropicali alla ricerca di *Wolbachia*, hanno scoperto che il 17 per cento delle 154 specie analizzate ospitava il batterio.

Tuttavia la frequenza reale dell'infezione potrebbe essere molto maggiore. Greg Hurst e collaboratori dello University College di Londra e dell'Università di Cambridge hanno rinvenuto diverse specie conosciute di *Wolbachia* in circa un decimo degli individui di una popolazione parassitata. Analizzando solo pochi individui di una certa specie, come ha fatto il gruppo di Rochester, è probabile che non si rilevino molti casi di infezione. Inoltre Marjorie Hoy e Jay Jeyaprakash dell'Università della Florida hanno appurato che il metodo utilizzato nello studio del gruppo di Rochester indica spesso erroneamente un'assenza del parassita. Con un metodo più sicuro, i ricercatori della Florida hanno trovato che oltre il 75 per cento delle specie in esame era stato infettato.

Il batterio è stato trovato, oltre che negli insetti, anche in crostacei (in particolare in isopodi e gamberetti di acqua dolce), acari e nematodi. Finora non è stato rinvenuto nei vertebrati. Si pensa che *Wolbachia* possa parassitare oltre 20 milioni di specie, e che quindi, fino a oggi, gli scienziati abbiano studiato solo la punta di un enorme e importante iceberg.

Maschi esigenti

Un metodo utilizzato da *Wolbachia* per condizionare profondamente le proprie vittime è quello di stravolgere il normale rapporto dei sessi nelle loro popolazioni. Per esempio, si è visto che i maschi sono estremamente rari in alcuni gruppi della farfalla africana *Acraea encedon*, come pure nell'isopode *Armadillidium vulgare*.

Nella farfalla questo fenomeno è causato dalla pervasività di un ceppo di *Wolbachia* che uccide i maschi (in oltre il 90 per cento delle femmine di *A. encedon* è presente questo parassita). Probabilmente il batterio elimina i maschi dell'ospite a beneficio dei membri del proprio ceppo che infettano le sorelle dei maschi uccisi. Questa azione di suicidio da parte di singole cellule batteriche ha senso perché nell'ospite maschio un batterio di *Wolbachia* è già condannato a morte. Lo sperma non lo trasmette e quindi il parassita, nel maschio, non ha niente da perdere. Per di più i suoi compagni che infettano le sorelle dei maschi uccisi traggono beneficio da questo comportamento perché tale uccisione avviene prima della schiusa delle uova. Di conseguenza, un banchetto di maschi uccisi è già pronto da divorare quando il resto della prole emerge dalle uova. Si pensa che questo cannibalismo da parte delle femmine infettate fornisca loro un importante vantaggio competitivo.

Sebbene questo vantaggio adattativo debba essere ancora dimostrato con certezza nelle larve di *A. encedon*, esso invece è stato confermato nella coccinella a due punti (*Adalia bipunctata*). L'intervallo tra la schiusa delle uova e il primo pasto a base di afidi è un momento di particolare vulnerabilità per le larve di questa coccinella. Il pasto gratuito rappresentato da un fratello deceduto è perciò un grande beneficio per loro, e di conseguenza per i parassiti loro ospiti.

Negli isopodi il parassita *Wolbachia* trasforma i futuri maschi in femmine. Femminilizzando i maschi, il parassita converte un ospite incapace di trasmetterlo in un vettore dell'infezione alla prole. Per ritornare al paragone della prigione, è come se il detenuto ricevesse un seghetto in una torta.

CAMBIAMENTI DI SESSO INDOTTI NEGLI OSPITI e una probabile speciazione forzata sembrano essere opera del batterio *Wolbachia*. Il piccolo parassita trasforma in femmine gli isopodi destinati a essere maschi (*sopra*) perché può riprodursi solo attraverso le uova. Sembra inoltre che la separazione tra due specie di vespe *Nasonia* (un esemplare è mostrato a fronte) sia stata provocata da *Wolbachia*.

Thierry Rigaud e altri, Università di Poitiers

John H. Werren

IN SINTESI

- Il batterio *Wolbachia* alligna nelle cellule dell'ospite operando con manipolazioni che vanno dall'uccisione della prole maschile alla trasformazione dei maschi in femmine, fino alla sterilità di alcuni accoppiamenti.
- *Wolbachia* è diffusa negli insetti tropicali, ma anche in crostacei, acari e nematodi.
- Un metodo che utilizza per condizionare le proprie vittime è stravolgere il normale rapporto dei sessi nelle loro popolazioni.
- Conseguenza di questi interventi, praticati per favorire la propria proliferazione, è che il batterio riduce il flusso genico tra diversi gruppi dell'ospite.
- Gli ostacoli frapposti da *Wolbachia* all'accoppiamento potrebbero, a lungo termine, divenire corresponsabili di fenomeni di speciazione.

GLI AUTORI

LAURENCE D. HURST e JAMES P. RANDERSON hanno collaborato nello studio del parassita *Wolbachia* all'Università di Bath, in Inghilterra. Hurst è professore di genetica evolutiva, e si interessa all'evoluzione dei sistemi genetici. Randerson, dopo aver conseguito il dottorato a Bath nel 2001, è entrato a far parte della redazione della rivista «New Scientist».

Sia nelle farfalle sia negli isopodi il batterio altera pesantemente il rapporto tra i sessi nelle popolazioni, spostandolo a favore delle femmine. I maschi perciò rappresentano una risorsa preziosa. La scarsità di maschi sovverte i normali ruoli sessuali: sono le femmine a essere cercate quando il rapporto dei sessi è normale; esse danno un contributo molto più grande ai nascituri con le uova, cellule grandi e ricche di sostanze nutritive, mentre l'investimento in sperma dei maschi è assai minore. In qualità di forti investitrici nella prole, le femmine sono tipicamente molto più esigenti dei maschi nella scelta dei partner, accettando solo quelli più idonei.

La selezione del partner in *Acraea* e *Armadillidium* avviene però a rovescio, perché i maschi sono una rarità. Le ricerche di Francis M. Jiggins e colleghi dell'Università di Cambridge hanno rivelato che in popolazioni di *A. encedon* pesantemente parassitate l'intero modello di scelta riproduttiva è sovvertito. Invece di muoversi nell'ambiente, le femmine si riuniscono in densi gruppi su piccole superfici erbose. In uno di questi gruppi sono state contate 350 farfalle stipate in un'area di 200 metri quadrati. Nelle specie con ruoli sessuali convenzionali - come il gallo della salvia (*Centrocercus urophasianus*) - questi gruppi (*lek*) sono formati dai maschi, e le femmine vanno a scegliere il partner.

I gruppi di aggregazione di *Acraea* potrebbero essere lek a ruoli invertiti, in cui sono i maschi a muoversi per la scelta del partner? I dati attuali non sono conclusivi. Dimostrando che le femmine vergini occupano i siti con maggior frequenza rispetto a quelle accoppiate, Jiggins ha stabilito che esse si riuniscono per trovare il partner; rimane però il dubbio se siano i maschi a effettuare la scelta.

In un primo tempo Jiggins aveva osservato che le femmine accoppiate hanno maggiore probabilità di non presentare infezione rispetto a quelle vergini; ciò implica che i maschi potrebbero preferire come partner le femmine non parassitate. Sfortunatamente Jiggins e uno di noi (Randerson) non sono riusciti a ripetere questa osservazione e la situazione continua a non essere chiara.

Nell'esempio degli isopodi Thierry Rigaud e collaboratori, dell'Università di Poitiers, in Francia, hanno dimostrato che i maschi evitano l'accoppiamento con maschi femminilizzati; inoltre, se si accoppiano con questi transessuali, liberano una quantità di sperma relativamente bassa.

Il nostro lavoro, che ha utilizzato modelli matematici per chiarire l'evoluzione della scelta in queste situazioni, ha dimostrato che una selezione naturale che favorisce tale alterazione comportamentale si verifica effettivamente se una popolazione è infettata da «stravolgitori» del rapporto dei sessi. Questo risultato solleva il problema di ciò che accade al parassita quando le femmine infettate non trovano un partner. I modelli teorici mostrano che, quando i maschi riescono a distinguere perfettamente tra femmine infettate e non infettate, il batterio finisce per essere eliminato dalla popolazione. Ma se i maschi commettono di tanto in tanto un errore, accoppiandosi con femmine parassitate, ciò basta a mantenere *Wolbachia* nella popolazione.

Cambiamenti di sesso negli ospiti

La scelta del partner da parte del maschio può essere una risposta alla diffusione di un batterio femminilizzante. Una risposta ancora più affascinante potrebbe essere l'evoluzione di nuovi meccanismi di determinazione genetica del sesso. Le ricerche effettuate da Rigaud e colleghi hanno dimostrato che *Wolbachia* può determinare il sesso in *A. vulgare*, perché i maschi di questo isopode possiedono tutti i geni necessari per diventare femmine. Tutto ciò che serve a un individuo per essere maschio è un po' di ormone mascolinizzante, secreto dalle ghiandole sessuali nei primi stadi dello sviluppo. Perciò, se il batterio parassita blocca lo sviluppo di queste ghiandole, il suo ospite sarà femmina.

In alcune popolazioni infettate, la determinazione del sesso passa sotto il controllo del parassita. Gli isopodi hanno una determinazione sessuale del tipo WZ: i maschi hanno cromosomi ZZ e le femmine WZ. (Questo schema è in contrasto con quello più comune, del tipo XY, dove i maschi sono XY e le femmine XX.) Dal momento che soltanto le poche uova che non contengono *Wolbachia* producono maschi, sono le femmine WZ infettate a generare la maggior parte della prole di sesso femminile: femmine WZ e maschi che hanno cambiato sesso (femmine ZZ). Queste femmine ZZ a loro volta danno origine quasi esclusivamente a femmine ZZ. Ne risulta che le femmine infettate di entrambi i tipi generano più individui di sesso femminile rispetto alle femmine normali. Perciò, nelle generazioni successive, la percentuale di individui con il normale cromosoma femminile W via via diminuisce e alla fine si avvicina a zero. A questo punto la determinazione del sesso è interamente controllata dal parassita, perché tutti gli individui sono ZZ; se l'isopode ospita il parassita è femmina, se ne è esente è maschio. In altri gruppi di isopodi infettati sembra che l'ospite abbia recuperato il controllo sul rapporto dei sessi regolando la percentuale della prole che riceve il batterio con meccanismi ancora ignoti.

La manipolazione più comune di *Wolbachia* consiste nell'interferire sull'efficienza dell'accoppiamento nell'ospite. Questa strategia, denominata incompatibilità citoplasmatica, ren-

de infecondi tutti gli accoppiamenti tra maschi infettati e femmine sane, perché il batterio libera tossine nel protoplasma dello spermatozoo (*si veda la finestra qui sotto*). Gli altri accoppiamenti si svolgono normalmente. Il blocco della procreazione di femmine non infettate avvantaggia indirettamente quelle che portano il batterio. Ne risulta che queste femmine contribuiscono in maggior misura alla generazione successiva, consentendo a *Wolbachia* di diffondersi con maggior facilità.

Una conseguenza di questa mediazione è che il batterio riduce il flusso genico tra gruppi diversi del suo ospite. Questo fenomeno è particolarmente pronunciato nell'incompatibilità citoplasmatica bidirezionale, allorché due gruppi dell'ospite contengono ceppi batterici reciprocamente incompatibili. In questo caso tutti gli accoppiamenti tra ospiti di gruppi diversi sono condannati a fallire per il sabotaggio del parassita.

Le barriere al libero flusso genico tra popolazioni sono di somma importanza nei processi di speciazione, cioè nella comparsa di nuove specie. Nell'esempio paradigmatico, i biologi immaginano la formazione di una barriera fisica, come l'innalzamento di una catena montuosa o la creazione di un'isola in seguito a innalzamento del livello del mare. L'ostacolo divide in due una popolazione inizialmente omogenea, interrompendo gli scambi tra le due nuove popolazioni e favorendo la loro deriva genetica. Col tempo le due nuove popolazioni divergeranno al punto che l'incrocio diverrà impossibile: dato che i sistemi genici dei loro genitori sono diventati incompatibili, eventuali ibridi saranno sterili o incapaci di sopravvivere.

Sulla via della speciazione

I biologi che studiavano *Wolbachia* hanno iniziato a domandarsi se gli ostacoli al flusso genico dovuti a incompatibilità citoplasmatica fossero sufficienti per consentire a una popolazione di suddividersi geneticamente anche in assenza di una barriera fisica. Simili batteri parassiti possono essere alla base di quella che dovremmo forse chiamare speciazione infettiva?

A questa domanda è difficile rispondere, perché il processo che vede una specie dividersi in due nuove specie è assai lungo. La cosa migliore da fare è cercare ospiti di *Wolbachia* che mostrino incompatibilità citoplasmatica e siano sulla via della speciazione. Studiando questi esempi significativi i biologi sperano di appurare se il parassita è un agente importante nell'evoluzione delle specie.

Sabotaggio sessuale

Un'importante tattica adattativa utilizzata da alcuni ceppi del batterio parassita *Wolbachia* consiste nell'interferire negli accoppiamenti dell'ospite, rendendone sterili taluni. Limitando il flusso genico negli ospiti, *Wolbachia* presumibilmente contribuisce alla formazione di nuove specie.

La cosiddetta incompatibilità citoplasmatica si attua quando un maschio infettato e una femmina sana tentano di accoppiarsi. Come strategia evolutiva, essa implica indirettamente un vantaggio per le femmine infettate a scapito di quelle sane.

Nei maschi alcuni ceppi di *Wolbachia* immettono una tossina nello sperma dell'ospite, la quale probabilmente altera le proteine che si legano al DNA. L'agente tossico provoca un'agglomerazione abnorme dei cromosomi maschili al momento della fusione con l'uovo e impedisce allo zigote appena formato di svilupparsi. Quando il maschio si accoppia con una femmina infettata, tale agglomerazione non si verifica, perché in questo caso *Wolbachia* libera nell'uovo un'antitossina che protegge lo zigote.

La manipolazione dell'ospite da parte del batterio è stata interpretata come una «bravata» evolutiva, in quanto riduce la fertilità delle femmine sane senza alcun beneficio per i batteri che sabotano lo sperma. La strategia è vincente, tuttavia, perché reca indirettamente beneficio alle femmine infettate e quindi ai parassiti in esse residenti. Queste femmine non hanno limitazioni nella scelta degli accoppiamenti e perciò sono avvantaggiate rispetto a quelle sane. Poiché le femmine infettate generano altre femmine infettate, questa strategia promuove la diffusione del batterio. Michael Turelli dell'Università della California a Davis e Ary A. Hoffmann della La Trobe University in Australia hanno dimostrato come questa strategia possa avere notevole successo: negli Stati Uniti nordorientali il cosiddetto ceppo Riverside di *Wolbachia*, che causa incompatibilità citoplasmatica, si sta diffondendo in tutto l'areale dell'ospite (il moscerino della frutta *Drosophila simulans*), lungo un fronte che avanza di circa 100 chilometri all'anno.

Nell'incompatibilità citoplasmatica unidirezionale è coinvolto solo un ceppo di *Wolbachia*, sicché vengono sabotati solo gli accoppiamenti in una direzione. Le cose si fanno più interessanti se c'è più di un ceppo che produce incompatibilità citoplasmatica, ossia se si verifica un'incompatibilità citoplasmatica bidirezionale.

Come esempio, si immaginino due ceppi batterici, A e B. Se l'antitossina di A è inefficace nei confronti della tossina di B e viceversa, allora gli accoppiamenti in entrambe le direzioni sono incompatibili. Se tutti gli individui della popolazione sono infettati con l'uno o l'altro ceppo, gli unici accoppiamenti fecondi sono quelli tra individui che ospitano lo stesso ceppo. Gli accoppiamenti tra ceppi diversi porteranno sempre a incompatibilità. I due ceppi di *Wolbachia* hanno così suddiviso la popolazione dell'ospite in due gruppi che non possono incrociarsi.

Nina Finkel

AUTOSTOPPISTI INDESIDERATI: il batterio *Wolbachia* si riproduce solo attraverso gli ospiti di sesso femminile, rendendo superflui i maschi. I parassiti appaiono nella foto come puntini verde chiaro su un uovo di insetto (*in alto*) e come macchioline all'interno di una cellula infettata (*in basso*).

Merijn Salverda e Richard Stouthamer (uovo); Claudio Bandi e Luciano Sacchi (cellula)

Due specie di vespe parassite che sembrano giunte quasi al termine di questo cammino sono *Nasonia vitripennis* e *N. giraulti*, distribuite nelle regioni orientali del Nordamerica. Uno studio condotto da Johannes A. J. Breeuwer dell'Università di Amsterdam e da Werren dell'Università di Rochester ha messo in luce che le barriere agli accoppiamenti fecondi tra queste specie non sono determinate unicamente dalle differenze genetiche tra le stesse, ma vi è coinvolta anche *Wolbachia*. I ricercatori hanno scoperto che, trattando entrambe le specie con antibiotici, gli accoppiamenti incrociati producono prole fertile. In assenza di antibiotici, la prole è sterile perché ciascuna specie di vespa contiene un ceppo differente del parassita, che porta a incompatibilità citoplasmatica tra gli ospiti.

Wolbachia non è però la sola causa dell'attuale separazione tra queste due specie di *Nasonia*. La seconda generazione di vespe ibride tende ad avere gravi problemi di sviluppo, e ciò probabilmente indica che le differenze nel DNA degli insetti stessi siano sufficienti a mantenere separate le specie. Non si è ancora appurato se in passato il parassita abbia avuto un ruolo nel favorire questa divergenza.

Nel caso della separazione riproduttiva tra *N. giraulti* e *N. longicornis* la storia è diversa. Queste vespe parassite costituiscono due entità tassonomicamente ben distinte, tanto è vero, per esempio, che parassitano ospiti diversi. Ma anche in questo caso *Wolbachia* ha un ruolo chiave, provocando incompatibilità citoplasmatica bidirezionale. Werren e i suoi colleghi Seth Bordenstein e Patrick O'Hara dell'Università di Rochester hanno recentemente dimostrato che in assenza del batterio gli ibridi sono perfettamente normali e rimangono tali anche nelle generazioni successive. Sebbene la divergenza nel DNA delle due specie di vespe non sia ancora insorta, *Wolbachia* sembra svolgere un'azione determinante nell'affermazione delle nuove specie.

In alcuni casi *Wolbachia* può contribuire al processo di speciazione senza esserne la causa primaria. Un gruppo di ricercatori, tra cui D. DeWayne Shoemaker della Western Michigan University, Vaishali Katju dell'Indiana University e John Jaenike dell'Università di Rochester, ha scoperto che perfino un ostacolo incompleto al flusso genico come quello rappresentato dall'incompatibilità citoplasmatica unidirezionale può contribuire all'isolamento riproduttivo (*si veda la finestra nella pagina a fronte*).

Shoemaker e colleghi hanno studiato due specie del moscerino della frutta, *Drosophila recens* e *D. subquinaria*. La prima è infettata da un ceppo di *Wolbachia* che provoca incompatibilità citoplasmatica, mentre la seconda non viene infettata. Ne risulta che gli accoppiamenti tra femmine di *D. subquinaria* e maschi di *D. recens* sono sterili. Se il solo fattore ad agire fosse *Wolbachia*, rimarrebbe possibile il flusso genico tra le due specie; ma di fatto questi accoppiamenti non sono fecondi. A differenza di *D. subquinaria*, le femmine di *D. recens* sono molto esigenti nella scelta del maschio e non accade quasi mai che si accoppino per errore con un maschio dell'altra specie.

Quindi i due meccanismi di barriera si completano. Il flusso genico in una direzione è ostacolato da *Wolbachia* (anche se gli accoppiamenti possono verificarsi), mentre il flusso inverso è impedito dall'accurata scelta del partner da parte delle femmine.

Nonostante questi e altri esempi significativi, non è stato ancora dimostrato che la speciazione infettiva avvenga effettivamente. Tuttavia è degno di nota che le infezioni da *Wolbachia* siano diffuse soprattutto in insetti e acari, ossia i gruppi animali più ricchi di specie. Forse *Wolbachia* ha avuto davvero un ruolo nel produrre nuovi germogli su queste rigogliose fronde dell'albero della vita.

Chi conduce il gioco?

Lungi dall'essere uno scroccone di second'ordine, il parassita *Wolbachia* è assai diffuso in natura e manipola in modi diversi la riproduzione di un gran numero di ospiti. Per di più i tentativi dell'ospite di eludere l'infezione ne hanno avviato i processi biologici ed evolutivi verso vie impensate. Ci aspettiamo che, quando si conoscerà più a fondo la biologia ancora misteriosa di *Wolbachia*, questo autorevole manovratore rivelerà altre sorprese.

BIBLIOGRAFIA

O'NEILL S. L., HOFFMANN A. A. e WERREN J. H., *Influential Passengers: Inherited Microorganisms and Arthropod Reproduction*, Oxford University Press, 1997.

JIGGINS F. M., HURST G. D. D. e MAJERUS M. E. N., *Sex-Ratio-Distorting* Wolbachia *Causes Sex-Role Reversal in Its Butterfly Host*, in «Proceedings of the Royal Society of London B», 267, n. 1438, 7 gennaio 2000.

BORDENSTEIN S. R., O'HARA F. P. e WERREN J. H., *Wolbachia-Induced Incompatibility Precedes Other Hybrid Incompatibilities in* Nasonia, in «Nature», 409, n. 6821, 8 febbraio 2001.

MOREAU J., BERTIN A., CAUBET Y. e RIGAUD T., *Sexual Selection in an Isopod with* Wolbachia*-Induced Sex Reversal: Males Prefer Real Females*, in «Journal of Evolutionary Biology», 14, n. 3, maggio 2001.